



Guilherme Filipe de Jesus Félix das Neves Loureiro

Licenciado em Engenharia Civil

Impulsos activos sobre estruturas de suporte em consola

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil

Perfil Estruturas e Geotecnia

Orientador: Professor Doutor Nuno Manuel da Costa Guerra

Júri:

Presidente:	Professor Doutor Corneliu Cismasiu
Arguente:	Professor Doutor Jorge Nuno Veiga de Almeida e Sousa
Vogal:	Professor Doutor Nuno Manuel da Costa Guerra



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro 2011

“Copyright” Guilherme Filipe de Jesus Félix das Neves Loureiro, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, não pode o autor da presente dissertação deixar de agradecer toda a disponibilidade, interesse, motivação e apoio demonstrados pelo Professor Nuno Manuel da Costa Guerra no acompanhamento deste trabalho.

A todos os colegas que de alguma forma contribuíram, com incentivo e amizade, nomeadamente aos Engenheiros Edgar Domingues, Filipe Correia, João Camões, Miguel Pires, Nuno Pires, Pedro Pires e Rui Gonçalves.

À mãe, por toda a força, dedicação e paciência que sempre demonstrou no decorrer do trabalho. Muito obrigado pelos esforços feitos ao longo de todo o percurso académico.

Ao pai e irmão, pela motivação demonstrada e pelo seu apoio. À restante família, nomeadamente, avô, primos, tios e, de modo especial à Rosa, pelo constante incentivo e carinho com que sempre apoiaram.

Ao Professor Jorge Nuno Veiga de Almeida e Sousa pela revisão do trabalho após a entrega da versão provisória.

Aos amigos, pelo incentivo e amizade demonstrados.

A todos um profundo e sincero obrigado.

Resumo

As estruturas de suporte em consola não têm um paramento bem definido no qual se possa considerar que os impulsos activos são aplicados. Com efeito, existe, por vezes, a designada “cunha morta”, que traduz o solo que acompanha o muro de suporte quando este sofre algum movimento. Revêem-se os métodos de determinação de impulsos de terras sobre estruturas de suporte em consola e da geometria da referida cunha. Comparam-se os resultados a que conduzem na determinação da componente horizontal do impulso activo e da relação entre esta componente e a força total vertical sobre a base do muro. Aplica-se o método de elementos finitos, através de cálculo elasto-plástico, à determinação das duas grandezas referidas e comparam-se os resultados obtidos numericamente com os dos métodos disponíveis. Conclui-se da adequabilidade da aplicação dos métodos tradicionalmente usados.

Palavras-chave:

Muros de suporte;
muros em consola;
impulso activo;
verificação do deslizamento.

Abstract

The cantilever retaining structures don't have a well defined face in which it can be considered that the active earth pressures are applied. Therefore, a "dead wedge" is formed, consisting by the the portion of the soil that moves with the wall. The methods for the determination of active earth pressures on cantilever retaining walls and of the geometry of this wedge are reviewed. Results of the application of these methods to the determination of the horizontal component of the active earth pressure and the ratio between this component and the total vertical force acting on the base of the wall are compared. The finite element method is applied, using elastic-perfectly plastic calculations, to determine the two quantities mentioned above and the results are compared with the results obtained by the available methods.

Keywords:

Retaining walls;
cantilever walls;
active earth pressure;
sliding verification.

Simbologia

a	Dimensão da parede da estrutura $[L]$
B	Dimensão da base da estrutura de suporte $[L]$
b	Menor espessura da parede do muro de gravidade $[L]$
b_1	Maior espessura da parede da estrutura $[L]$
B_1, B_2, B_3	Parcelas da base da estrutura de suporte $[L]$
b_2	Menor espessura da parede da estrutura $[L]$
c'	Coesão efectiva do solo $[FL^{-2}]$
d	Deslocamento horizontal $[L]$
E	Módulo de Young $[FL^{-2}]$
e	Espessura da base da estrutura $[L]$
F_a	Força de atrito na base da estrutura $[FL^{-1}]$
H	Altura da estrutura de suporte $[L]$
h	Dimensão auxiliar da altura do paramento virtual - Método C_2 $[L]$
H'	Altura total do paramento virtual - Método R $[L]$
H_1	Altura total do paramento virtual - Método C_2 $[L]$
h_1	Componente da altura total da estrutura - Método C_2 $[L]$
h_2	Componente da altura total da estrutura - Método C_2 $[L]$
h_3	Componente da altura total da estrutura - Método C_2 $[L]$
h_3'	Dimensão auxiliar da altura do paramento virtual - Método C_2 $[L]$
i	Inclinação da superfície do terreno
I^H	Componente horizontal do impulso $[FL^{-1}]$
I_a	Impulso activo $[FL^{-1}]$
I_a^H	Componente horizontal do impulso activo $[FL^{-1}]$
I_a^V	Componente vertical do impulso activo $[FL^{-1}]$

K_a	Coefficiente de impulso activo
L	Tipo de secção do muro de suporte
l	Dimensão auxiliar da base da estrutura $[L]$
l_2	Dimensão auxiliar da base da estrutura $[L]$
l_3	Dimensão auxiliar da base da estrutura $[L]$
R_{inter}	Factor de redução de resistência de interface
T	Tipo de secção do muro de suporte
V	Resultante das cargas verticais $[FL^{-1}]$
W	Peso total da cunha de solo e do muro $[F]$
w_1	Componente do peso total da estrutura $[FL^{-1}]$
w_2	Componente do peso total da estrutura $[FL^{-1}]$
w_{s1}	Componente auxiliar do peso do solo na cunha morta $[F]$
w_{s2}	Componente auxiliar do peso do solo na cunha morta $[F]$
w_{s3}	Componente auxiliar do peso do solo na cunha morta $[F]$
w_s	Peso do solo na cunha morta $[FL^{-1}]$
z	Profundidade do solo $[L]$
α	Componente da inclinação da face exterior da parede da estrutura
β	Inclinação do paramento virtual em relação à horizontal
β_B	Inclinação da cunha de solo - Barghouthi
β'_B	Inclinação variável do paramento virtual em relação à horizontal - Barghouthi
β_B^*	Inclinação fixa do paramento virtual em relação à horizontal - Barghouthi
β_{C1}	Inclinação do paramento virtual em relação à horizontal - método C_1
β_{C2}	Inclinação variável do paramento virtual em relação à horizontal - método C_2
β_{C2}^*	Inclinação fixa do paramento virtual em relação à horizontal - método C_2
β_{C2, I_a^H}	Inclinação variável do paramento virtual, em relação à horizontal - componente horizontal do impulso activo
$\beta_{C2, \tan \delta}$	Inclinação variável do paramento virtual, em relação à horizontal - condição de deslizamento
γ	Peso volúmico do solo $[FL^{-3}]$
γ_b	Peso volúmico da estrutura de suporte $[FL^{-3}]$
δ	Ângulo de atrito solo-estrutura
δ_p	Ângulo de atrito no contacto solo-estrutura - Método C_2

ε	Deformação do solo $[L]$
θ_{C1}	Inclinação do paramento virtual em relação à vertical - método C_1
θ_{C2}	Inclinação variável do paramento virtual em relação à vertical - método C_2
θ_{C2}^*	Inclinação fixa do paramento virtual em relação à vertical - método C_2
ξ	Componente da inclinação da face exterior da parede da estrutura
σ'	Tensão efectiva $[FL^{-2}]$
$\sigma'_{h,a}$	Tensão efectiva horizontal activa $[FL^{-2}]$
σ'_v	Tensão efectiva vertical $[FL^{-2}]$
τ	Tensão de corte tangencial $[FL^{-2}]$
ν	Coefficiente de Poisson
ϕ'	Ângulo de resistência ao corte efectivo do solo
φ	Inclinação interior da parede da estrutura
ψ	Ângulo de dilatação do solo

Conteúdo

1	Introdução	1
2	Revisão bibliográfica	3
2.1	Introdução	3
2.2	Métodos clássicos de determinação de impulsos activos	3
2.2.1	A teoria de Rankine	3
2.2.2	A teoria de Coulomb	5
2.3	Tipos de muros de suporte	7
2.3.1	Muros de gravidade	7
2.3.2	Muros em consola	10
2.4	Impulsos activos sobre estruturas de suporte em L ou T invertido	11
2.4.1	Método baseado na teoria de Rankine (Método R) (Terzaghi et al., 1948)	12
2.4.2	Método baseado no método de Coulomb (Método C_1) (Mineiro, 1978)	13
2.4.3	Método baseado no método de Coulomb (Método C_2) (Matos Fernandes et al., 1997)	14
3	Análise de estruturas de suporte em L	19
3.1	Introdução	19
3.2	Definição da estrutura de suporte	19
3.3	Cálculo dos impulsos sobre a estrutura de suporte	20
3.3.1	Método R	20
3.3.2	Método C_1	21
3.3.3	Método C_2	22
3.4	Condição de deslizamento	26
3.4.1	Método R	28
3.4.2	Método C_1	29
3.4.3	Método C_2	30
3.5	Análise paramétrica: inf. de ϕ' , i e comp. da base da estrutura B_1	32
3.5.1	Impulsos	32
3.5.1.1	Métodos R e C_1	32
3.5.1.2	Método C_2	33
3.5.2	Condição de deslizamento	35
3.5.2.1	Métodos R e C_1	35
3.5.2.2	Método C_2	35
3.5.3	Resultados do impulso activo	36
3.5.3.1	Apresentação dos resultados	36

3.5.3.2	Análise dos resultados	43
3.5.4	Resultados da condição de deslizamento	46
3.5.4.1	Apresentação dos resultados	46
3.5.4.2	Análise dos resultados	53
3.6	Análise paramétrica: influência de δ	56
3.6.1	Análises realizadas	56
3.6.2	Resultados	56
3.6.3	Análise dos resultados	61
3.7	Análise paramétrica: influência de e/H	61
3.7.1	Análises realizadas	61
3.7.2	Resultados	61
3.7.3	Análise dos resultados	64
4	Aplicação de método numérico	65
4.1	Introdução	65
4.2	Modelo constitutivo <i>Mohr-Coulomb</i>	65
4.3	Caso base	67
4.3.1	Descrição do caso base	67
4.3.2	Resultados e análise	69
4.4	Análise paramétrica	72
4.4.1	Descrição dos casos analisados	72
4.4.2	Análise da influência do factor R_{inter}	72
4.4.2.1	Análises realizadas	72
4.4.2.2	Resultados	73
4.4.2.3	Análise dos resultados	77
4.4.3	Análise da influência do ângulo de resistência ao corte do solo, ϕ'	77
4.4.3.1	Análises realizadas	77
4.4.3.2	Resultados	77
4.4.3.3	Análise dos resultados	82
4.4.4	Análise da influência do comprimento da base da estrutura B_1	82
4.4.4.1	Análises realizadas	82
4.4.4.2	Resultados	82
4.4.4.3	Análise dos resultados	97
4.4.5	Análise da influência da inclinação da superfície do terreno i	97
4.4.5.1	Análises realizadas	97
4.4.5.2	Resultados	97
4.4.5.3	Análise dos resultados	100
5	Conclusões e futuros desenvolvimentos	101
5.1	Conclusões	101
5.2	Futuros desenvolvimentos	102

Lista de Figuras

1.1	Muro em consola. Representação da “cunha morta” e do paramento virtual.	1
2.1	Impulso de terras: A teoria de Rankine.	4
2.2	Determinação do impulso activo através da teoria de Rankine (adaptado de Mineiro, 1978).	4
2.3	Impulso de terras: a teoria de Rankine aplicada a terreno com inclinação (adaptado de Cernica, 1994).	5
2.4	Cunha de solo activa através da teoria de Coulomb (adaptado de Cernica, 1994). . . .	6
2.5	Geometria de muros de gravidade (Cernica, 1994).	7
2.6	Muro de gravidade com perfil rectangular (adaptado de Domingues (1997)).	7
2.7	Muro de gravidade com perfil trapezoidal (adaptado de Domingues (1997)).	8
2.8	Muro de gravidade com perfil em escada (adaptado de Domingues (1997)).	9
2.9	Tipologia das gaiolas e geometria da malha (BS 8002:1994 (2002)).	9
2.10	Muro de gabiões (Aguiar e Martins, 2005).	10
2.11	Geometria de muros em consola (Cernica, 1994).	11
2.12	Representação de muro com ancoragens.	11
2.13	Superfície de rotura: Estado activo (Terzaghi et al., 1948).	12
2.14	Representação esquemática do método baseado na teoria de Rankine - método R (adaptado de Terzaghi et al., 1948).	12
2.15	Representação esquemática do método baseado no método de Coulomb - método C_1 . .	13
2.16	Método de avaliação dos impulsos em muros de betão armado (Matos Fernandes et al. (1997)).	14
2.17	Representação esquemática do método C_2 : inclinação do paramento virtual do muro. .	15
2.18	Representação esquemática do método C_2 : diagramas de tensões.	15
2.19	Muro em consola e cunhas de terras em estado activo (adaptado de Matos Fernandes, 2011).	16
2.20	Avaliação do impulso activo em muros em consola. Caso em que a superfície que define o paramento se encontra acima do topo do muro (adaptado de Matos Fernandes, 2011). .	17
2.21	Avaliação do impulso activo em muros em consola. Caso em que a superfície que define o paramento se encontra abaixo do topo do muro (adaptado de Matos Fernandes, 2011). .	17
3.1	Representação das dimensões gerais da estrutura de suporte.	19
3.2	Representação das dimensões do modelo adoptado.	20
3.3	Representação das considerações do método R	21
3.4	Representação das considerações do método C_1	22
3.5	Representação das considerações do método C_2	23

3.6	Pormenor da representação de grandezas: Método C_2 .	24
3.7	Representação dos impulsos parciais: Método C_2 .	25
3.8	Ilustração genérica das principais grandezas envolvidas no estudo da condição de deslizamento: exemplo método R .	27
3.9	Representação de grandezas: método R .	28
3.10	Representação de grandezas: método C_1 .	29
3.11	Representação de grandezas: método C_2 .	30
3.12	Representação do peso presente na cunha de solo: método C_2 .	31
3.13	<i>Layout</i> do <i>input</i> : Método C_2 .	34
3.14	<i>Layout</i> do <i>output</i> : Método C_2 .	34
3.15	Variação do impulso activo adimensionalizado com a largura adimensionalizada do muro para diversas inclinações do terreno: $\phi' = 20^\circ$; $e/H = 0,125$.	37
3.16	Variação do impulso activo adimensionalizado com a largura adimensionalizada do muro para diversas inclinações do terreno: $\phi' = 30^\circ$; $e/H = 0,125$.	38
3.17	Variação do impulso activo adimensionalizado com a largura adimensionalizada do muro para diversas inclinações do terreno: $\phi' = 40^\circ$; $e/H = 0,125$.	39
3.18	Variação do impulso activo adimensionalizado com a largura adimensionalizada do muro para diversas inclinações do terreno: $\phi' = 40^\circ$; $e/H = 0,125$ (continuação).	40
3.19	Variação do impulso activo adimensionalizado com a largura adimensionalizada do muro para diversas inclinações do terreno: $\phi' = 45^\circ$; $e/H = 0,125$.	41
3.20	Variação do impulso activo adimensionalizado com a largura adimensionalizada do muro para diversas inclinações do terreno e $\phi' = 45^\circ$; $e/H = 0,125$ (continuação).	42
3.21	Variação do impulso activo adimensionalizado com a largura adimensionalizada do muro para diversos ângulos de resistência ao corte e inclinações do terreno: resultados obtidos pelo método C_2 : $e/H = 0,125$.	44
3.22	Variação da inclinação β_{C_2, I_a^H} com a largura adimensionalizada do muro para diversas inclinações do terreno e ângulos de resistência ao corte do solo : método C_2 : $e/H = 0,125$.	45
3.23	Representação da inclinação β_{C_2, I_a^H} para $\phi' = 20^\circ$, $e/H = 0,125$ e $i = 5^\circ$: método C_2 .	46
3.24	Variação da condição de deslizamento com a largura adimensionalizada do muro para diversas inclinações do terreno: $\phi' = 20^\circ$; $e/H = 0,125$.	47
3.25	Variação da condição de deslizamento com a largura adimensionalizada do muro para diversas inclinações do terreno: $\phi' = 30^\circ$; $e/H = 0,125$.	48
3.26	Variação da condição de deslizamento com a largura adimensionalizada do muro para diversas inclinações do terreno: $\phi' = 40^\circ$; $e/H = 0,125$.	49
3.27	Variação da condição de deslizamento com a largura adimensionalizada do muro para diversas inclinações do terreno: $\phi' = 40^\circ$; $e/H = 0,125$ (continuação).	50
3.28	Variação da condição de deslizamento com a largura adimensionalizada do muro para diversas inclinações do terreno: $\phi' = 45^\circ$; $e/H = 0,125$.	51
3.29	Variação da condição de deslizamento com a largura adimensionalizada do muro para diversas inclinações do terreno: $\phi' = 45^\circ$; $e/H = 0,125$ (continuação).	52
3.30	Variação da condição de deslizamento com a largura adimensionalizada do muro para diversos ângulos de resistência ao corte e inclinações do terreno: resultados obtidos pelo método C_2 .	54
3.31	Variação da inclinação $\beta_{C_2, \tan \delta}$ com a largura adimensionalizada do muro para diversas inclinações do terreno e ângulos de resistência ao corte do solo : método C_2 .	55

3.32	Influência do parâmetro δ_{s-e} no impulso activo horizontal para $B_1 = 2m$ ($\frac{B_2}{H} = 0,188$); $\phi' = 30^\circ$. Caso $\beta_{C2} > \beta_{C2}^*$	57
3.33	Influência do parâmetro δ_{s-e} no impulso activo horizontal para $B_1 = 7m$ ($\frac{B_2}{H} = 0,813$); $\phi' = 30^\circ$. Caso $\beta_{C2} < \beta_{C2}^*$	58
3.34	Influência do parâmetro δ_{s-e} na condição de deslizamento do muro para $B_1 = 2m$ ($\frac{B_2}{H} = 0,188$); $\phi' = 30^\circ$. Caso $\beta_{C2} > \beta_{C2}^*$	59
3.35	Influência do parâmetro δ_{s-e} na condição de deslizamento do muro para $B_1 = 7m$ ($\frac{B_2}{H} = 0,813$); $\phi' = 30^\circ$. Caso $\beta_{C2} < \beta_{C2}^*$	60
3.36	Variação do impulso activo adimensionalizado com a largura adimensionalizada do muro para diversos valores de e/H : $\phi' = 30^\circ$; $\delta = 2/3\phi'$; $i = 0^\circ$	62
3.37	Variação da condição de deslizamento com a largura adimensionalizada do muro para diversos valores de e/H : $\phi' = 30^\circ$; $\delta = 2/3\phi'$; $i = 0^\circ$	63
4.1	Modelo elástico perfeitamente plástico.	66
4.2	Critério de cedência de Mohr-Coulomb (Brinkgreve et al., 2004).	66
4.3	Superfície de rotura do modelo Mohr-Coulomb, no espaço das tensões principais, para solos não coesivos (Brinkgreve et al., 2004).	66
4.4	Dimensões da estrutura de suporte: modelo de elementos finitos. Caso base.	68
4.5	Malha do modelo de elementos finitos: caso base.	68
4.6	Representação do impulso horizontal em função do deslocamento horizontal: caso base.	69
4.7	Representação da relação entre as cargas horizontais e verticais (condição de deslizamento do muro) em função do deslocamento horizontal: caso base.	70
4.8	Representação da deformação do solo após a imposição do deslocamento horizontal ($d = 15\text{ mm}$): caso base.	70
4.9	Representação, por graduação de cores, dos deslocamentos horizontais no maciço ($d = 15\text{ mm}$): caso base.	70
4.10	Representação dos pontos plásticos em função do deslocamento aplicado para $B_1 = 4m$ ($\frac{B_2}{H} = 0,438$); $\phi' = 30^\circ$; $R_{inter} = \frac{2}{3}$; $i = 0^\circ$. Sobreposição das superfícies que decorrem do método C_2	71
4.11	Influência do factor R_{inter} no impulso activo horizontal para $\frac{B_2}{H} = 0,438$; $\phi' = 30^\circ$. Comparação com os métodos clássicos.	73
4.12	Influência do factor R_{inter} na condição de deslizamento do muro para $\frac{B_2}{H} = 0,438$; $\phi' = 30^\circ$. Comparação com os métodos clássicos.	74
4.13	Representação dos pontos plásticos em função de R_{inter} para $B_1 = 4m$; $\phi' = 30^\circ$; $i = 0^\circ$. Sobreposição das superfícies resultantes da aplicação do método C_2	75
4.14	Representação dos pontos plásticos em função de R_{inter} para $B_1 = 4m$; $\phi' = 30^\circ$; $i = 15^\circ$. Sobreposição das superfícies resultantes da aplicação do método C_2	76
4.15	Influência do ângulo de resistência ao corte ϕ' no impulso activo horizontal para $\frac{B_2}{H} = 0,438$; $R_{inter} = \frac{2}{3}$. Comparação com os métodos clássicos.	78
4.16	Influência do ângulo de resistência ao corte ϕ' na condição de deslizamento do muro para $\frac{B_2}{H} = 0,438$; $R_{inter} = \frac{2}{3}$. Comparação com os métodos clássicos.	79
4.17	Representação dos pontos plásticos em função de ϕ' para $B_1 = 4m$; $R_{inter} = 2/3$; $i = 0^\circ$. Sobreposição das superfícies resultantes da aplicação do método C_2	80
4.18	Representação dos pontos plásticos em função de ϕ' para $B_1 = 4m$; $R_{inter} = 2/3$; $i = 15^\circ$. Sobreposição das superfícies resultantes da aplicação do método C_2	81

4.19	Variação do impulso activo horizontal, adimensionalizado, com a largura adimensionalizada do muro para diversas inclinações do terreno e $R_{inter} = 2/3$; $\phi' = 30^\circ$. Comparação com os métodos clássicos.	83
4.20	Variação do impulso activo horizontal, adimensionalizado, com a largura adimensionalizada do muro para diversas inclinações do terreno e $R_{inter} = 2/3$; $\phi' = 40^\circ$. Comparação com os métodos clássicos.	84
4.21	Variação do impulso activo horizontal, adimensionalizado, com a largura adimensionalizada do muro para diversas inclinações do terreno e $R_{inter} = 2/3$; $\phi' = 40^\circ$. Comparação com os métodos clássicos (continuação).	85
4.22	Variação do impulso activo horizontal, adimensionalizado, com a largura adimensionalizada do muro para diversas inclinações do terreno e $R_{inter} = 2/3$; $\phi' = 45^\circ$. Comparação com os métodos clássicos.	86
4.23	Variação do impulso activo horizontal, adimensionalizado, com a largura adimensionalizada do muro para diversas inclinações do terreno e $R_{inter} = 2/3$; $\phi' = 45^\circ$. Comparação com os métodos clássicos (continuação).	87
4.24	Variação da condição de deslizamento com a largura adimensionalizada do muro para diversas inclinações do terreno e $R_{inter} = 2/3$; $\phi' = 30^\circ$. Comparação com os métodos clássicos.	88
4.25	Variação da condição de deslizamento com a largura adimensionalizada do muro para diversas inclinações do terreno e $R_{inter} = 2/3$; $\phi' = 40^\circ$. Comparação com os métodos clássicos.	89
4.26	Variação da condição de deslizamento com a largura adimensionalizada do muro para diversas inclinações do terreno e $R_{inter} = 2/3$; $\phi' = 40^\circ$. Comparação com os métodos clássicos (continuação).	90
4.27	Variação da condição de deslizamento com a largura adimensionalizada do muro para diversas inclinações do terreno e $R_{inter} = 2/3$; $\phi' = 45^\circ$. Comparação com os métodos clássicos.	91
4.28	Variação da condição de deslizamento com a largura adimensionalizada do muro para diversas inclinações do terreno e $R_{inter} = 2/3$; $\phi' = 45^\circ$. Comparação com os métodos clássicos (continuação).	92
4.29	Representação dos pontos plásticos em função do comprimento da base para $\phi' = 30^\circ$; $R_{inter} = 2/3$; $i = 0^\circ$. Sobreposição das superfícies resultantes da aplicação do método C_2	93
4.30	Representação dos pontos plásticos em função do comprimento da base para $\phi' = 40^\circ$; $R_{inter} = 2/3$; $i = 0^\circ$. Sobreposição das superfícies resultantes da aplicação do método C_2	94
4.31	Representação dos pontos plásticos em função do comprimento da base para $\phi' = 30^\circ$; $R_{inter} = 2/3$; $i = 15^\circ$. Sobreposição das superfícies resultantes da aplicação do método C_2	95
4.32	Representação dos pontos plásticos em função do comprimento da base para $\phi' = 40^\circ$; $R_{inter} = 2/3$; $i = 20^\circ$. Sobreposição das superfícies resultantes da aplicação do método C_2	96
4.33	Influência da inclinação da superfície do terreno i no impulso activo horizontal para $\frac{B_2}{H} = 0,438$; $R_{inter} = \frac{2}{3}$; $\phi' = 30^\circ$. Comparação com os métodos clássicos.	97
4.34	Influência da inclinação da superfície do terreno i na condição de deslizamento do muro para $\frac{B_2}{H} = 0,438$; $R_{inter} = \frac{2}{3}$; $\phi' = 30^\circ$. Comparação com os métodos clássicos.	98

4.35	Representação dos pontos plásticos em função da inclinação da superfície do terreno para $B_1 = 4\text{ m}$; $\phi' = 30^\circ$; $R_{inter} = 2/3$. Sobreposição das superfícies resultantes da aplicação do método C_2	99
------	--	----

Lista de Tabelas

2.1	Dimensões para o pré-dimensionamento (Moliterno, 1980).	8
3.1	Parâmetros iniciais usados nas análises dos métodos R e C_1	33
3.2	Valores dos ângulos de resistência ao corte do solo e da inclinação da superfície do terreno analisados.	33
3.3	Resultados obtidos por Barghouthi (1990) (indicados com o índice B); comparação com os resultados do método C_2	35
3.4	Pesos presentes no modelo de cálculo.	35
4.1	Parâmetros utilizados pelo modelo <i>Mohr-Coulomb</i>	67
4.2	Características do solo e estrutura considerados.	68
4.3	Resultados obtidos através dos diferentes métodos: $I_a^H / \frac{1}{2} \gamma H^2$ e $\tan \delta$. Caso base: $\frac{B_2}{H} = 0,438$; $\phi' = 30^\circ$; $R_{inter} = \frac{2}{3}$; $i = 0^\circ$	71
4.4	Análises realizadas.	72

Capítulo 1

Introdução

Muitos dos muros de suporte actualmente projectados e executados são muros em consola, ou seja, em L ou em T invertido, do tipo do representado na Figura 1.1. Estes muros de suporte apresentam como dificuldade, na sua análise, a determinação dos impulsos activos que sobre eles actuam.

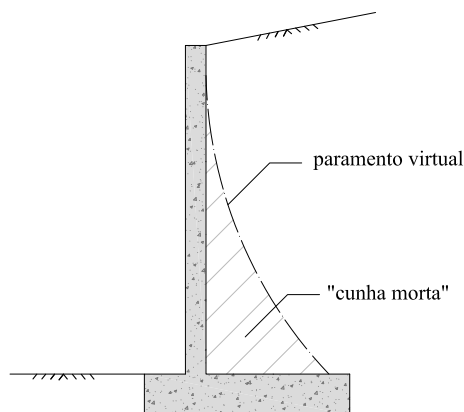


Figura 1.1: Muro em consola. Representação da “cunha morta” e do paramento virtual.

Com efeito, a geometria do muro de suporte proporciona que, normalmente, um pequeno movimento do muro seja acompanhado por uma cunha de solo, habitualmente designada por “cunha morta”, que actua sempre com o seu peso e movimento como parte do muro, originando um paramento virtual cuja geometria se desconhece.

O presente trabalho pretende estudar e comparar entre si os métodos disponíveis para definir a localização do paramento virtual e determinar os impulsos sobre a estrutura de suporte. Visa, igualmente, comparar os resultados da análise da condição de deslizamento inferida dos métodos disponíveis. Os métodos disponíveis são descritos no Capítulo 2 e as comparações referidas feitas no Capítulo 3.

Com vista a analisar a adequabilidade dos métodos disponíveis, tanto para estimar os impulsos activos como para analisar a condição de deslizamento, como, ainda, para definir a localização do paramento virtual, procede-se a um conjunto de análises numéricas, por elementos finitos, que são usadas para comparação. Tal é apresentado no Capítulo 4. No Capítulo 5 apresentam-se as principais conclusões do estudo efectuado.

Capítulo 2

Revisão bibliográfica

2.1 Introdução

Os muros podem ser construídos em alvenaria, betão, betão armado ou outros materiais. Os muros de suporte em L ou em T invertido são estruturas frequentemente utilizadas em obras de Engenharia Civil. Os impulsos de terras habitualmente considerados no seu dimensionamento recorrem, com regularidade, às teorias clássicas de Rankine (1857) e Coulomb (1776).

No presente capítulo pretende-se fazer um breve levantamento do tipo de muros existentes e apresentam-se as teorias clássicas de cálculo de impulsos para os casos de solos com comportamento admitido puramente atrítico e que obedecem aos critérios de rotura de Mohr-Coulomb. Apresenta-se, igualmente, a forma como estas teorias clássicas são empregues no cálculo dos impulsos sobre estruturas e aborda-se, em especial, os muros de suporte em consola.

2.2 Métodos clássicos de determinação de impulsos activos

2.2.1 A teoria de Rankine

A teoria de Rankine é passível de ser considerada quando uma estrutura de suporte se movimenta em direcção oposta à do terreno, de forma suficiente para que o estado de tensão activo seja mobilizado. Rankine (1857) aponta algumas hipóteses de validade que deverão ser tidas em consideração para que o seu método possa ser aplicado (Cernica, 1994). São elas:

- a superfície do terreno suportado ser horizontal;
- a superfície de contacto entre o solo e a estrutura de suporte ser vertical;
- não existir atrito nem coesão no contacto solo-estrutura de suporte;
- o solo ser homogéneo, isotrópico e seco.

Nas condições acima referidas, o impulso resulta horizontal e as tensões efectivas vertical e horizontal são principais. Deste modo, a tensão efectiva vertical é dada por:

$$\sigma'_v = \gamma z \quad (2.1)$$

em que γ representa o peso volúmico do solo e z a profundidade considerada.

Definindo K_a como o coeficiente de impulso activo, que relaciona a tensão efectiva vertical com a tensão efectiva horizontal num dado elemento de solo, tem-se:

$$K_a = \frac{\sigma'_{h,a}}{\sigma'_v} \quad (2.2)$$

Assim, a tensão efectiva horizontal activa é dada pela seguinte expressão:

$$\sigma'_{h,a} = K_a \gamma z \quad (2.3)$$

A envolvente de rotura é determinada através da expressão apresentada de seguida, que retrata o problema simples, em que o terreno responde em condições drenadas (Terzaghi et al., 1948).

$$\tau = \sigma' \tan \phi' \quad (2.4)$$

em que ϕ' representa o ângulo de resistência ao corte do solo.

Ilustra-se, na Figura 2.1, o caso simples acima referido. Sendo a tensão efectiva vertical dada pelo produto apresentado na expressão 2.1 percebe-se que, com o aumento da profundidade, o valor daquela tensão aumenta de forma proporcional.

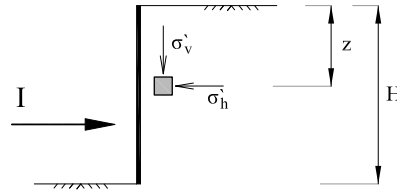


Figura 2.1: Impulso de terras: A teoria de Rankine.

De modo a caracterizar o estado de tensão do elemento de solo, apresenta-se, na Figura 2.2, o círculo de Mohr com a envolvente de rotura do solo, dada pela expressão 2.4. Ao ser admitida a inexistência de atrito no contacto solo-estrutura, no caso de ocorrer um determinado deslocamento da estrutura na direcção oposta ao terreno suportado, existirá uma diminuição da tensão horizontal naquele elemento, podendo atingir a rotura e, por conseguinte, mobilizar o estado activo.

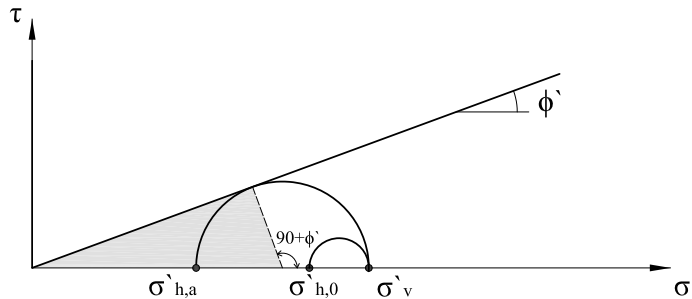


Figura 2.2: Determinação do impulso activo através da teoria de Rankine (adaptado de Mineiro, 1978).

Com base na representação do círculo de Mohr, é possível estabelecer a relação, para o caso básico em que uma estrutura suporta um terreno com superfície horizontal:

$$\sin \phi' = \frac{\frac{\sigma'_v - \sigma'_{h,a}}{2}}{\frac{\sigma'_v + \sigma'_{h,a}}{2}} = \frac{\sigma'_v - \sigma'_{h,a}}{\sigma'_v + \sigma'_{h,a}} = \frac{\sigma'_v - \sigma'_v K_a}{\sigma'_v + \sigma'_v K_a} = \frac{1 - K_a}{1 + K_a} \Rightarrow K_a = \frac{1 - \sin \phi'}{1 + \sin \phi'} \quad (2.5)$$

Admitindo um solo homogêneo, em que o peso volúmico γ e o ângulo de resistência ao corte do solo ϕ' são constantes, o diagrama de tensões resulta triangular, aumentando linearmente com a profundidade.

A resultante pode ser então obtida através da área do referido diagrama, entre a superfície do terreno suportado e a profundidade H . Assim, o impulso activo é calculado de acordo com a expressão (Terzaghi et al., 1948):

$$I_a = \int_0^H K_a \sigma'_v dz = \int_0^H K_a \gamma z dz = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2 \quad (2.6)$$

sendo:

K_a - coeficiente de impulso activo;

γ - peso volúmico do solo;

H - altura da estrutura de suporte.

Para além do referido, a teoria de Rankine, não obstante as hipóteses por si preconizadas, anteriormente mencionadas, pode ser estendida ao caso da existência de inclinação na superfície do terreno suportado pela estrutura. A resultante do impulso gerado no tardo terá a mesma inclinação da superfície do terreno suportado, admitindo que esta consideração não produz alterações no diagrama de tensões actantes. Genericamente, apresenta-se, na Figura 2.3, o problema em questão.

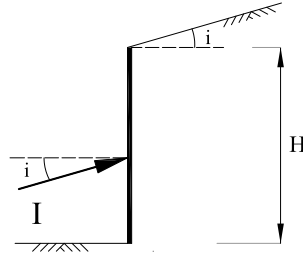


Figura 2.3: Impulso de terras: a teoria de Rankine aplicada a terreno com inclinação (adaptado de Cernica, 1994).

O coeficiente de impulso K_a será influenciado pela alteração da inclinação e calculado através da expressão (Cernica, 1994):

$$K_a = \cos i \times \frac{1 - \sqrt{1 - \frac{\cos^2 \phi'}{\cos^2 i}}}{1 + \sqrt{1 - \frac{\cos^2 \phi'}{\cos^2 i}}} \quad (2.7)$$

em que:

i - inclinação da superfície do terreno;

ϕ' - ângulo de resistência ao corte do solo.

2.2.2 A teoria de Coulomb

Coulomb (1776) considera que o solo suportado pela estrutura de contenção se encontra num estado de equilíbrio limite e que a movimentação da mesma é suficiente para que o estado activo seja mobilizado.

O muro, ao deslocar-se, é acompanhado por uma cunha de solo, que do restante solo se destaca. Esta cunha de solo é definida por uma superfície planar, ilustrada na Figura 2.4. Na verdade, a admissão de uma superfície de rotura plana leva a soluções inferiores às reais, uma vez que, de facto, aquela se dá ao longo de uma superfície curvilínea. No entanto, os resultados obtidos podem ser considerados aceitáveis. Ao contrário do considerado na teoria de Rankine, no método de Coulomb considera-se a existência de atrito no contacto solo-estrutura.

Todas as considerações feitas são válidas, segundo o autor, para solos não coesivos, secos e homogêneos.

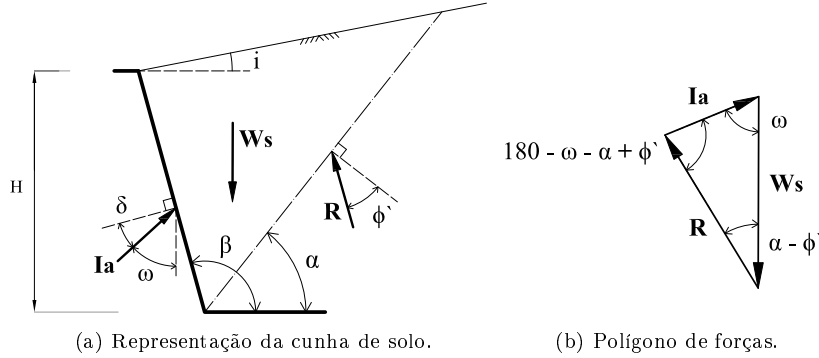


Figura 2.4: Cunha de solo activa através da teoria de Coulomb (adaptado de Cernica, 1994).

Procurando-se conhecer a expressão que conduz ao impulso activo, é possível, através do polígono de forças presente na Figura 2.4b chegar à seguinte igualdade, através da lei dos senos:

$$\frac{I_a}{\sin(\alpha - \phi')} = \frac{W}{\sin(180 - \omega - \alpha + \phi')} \Rightarrow I_a = W \frac{\sin(\alpha - \phi')}{\sin(180 - \omega - \alpha + \phi')} \quad (2.8)$$

A cunha de rotura é caracterizada pela inclinação da superfície de rotura, α , pelo que, de modo a obter-se o máximo do impulso activo a partir da equação 2.8, iguala-se a derivada em ordem a α a zero:

$$\frac{\partial I_a}{\partial \alpha} = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial}{\partial \alpha} \left[W \frac{\sin(\alpha - \phi')}{\sin(180 - \omega - \alpha + \phi')} \right] = 0 \quad (2.9)$$

Muller e Breslau concluíram, em 1906, que a solução da expressão que caracteriza o impulso activo é dada por (Mineiro, 1978):

$$I_a = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2 \quad (2.10)$$

em que o coeficiente de impulso activo K_a é calculado através da expressão:

$$K_a = \left[\frac{\frac{1}{\sin \beta} \times \sin(\beta - \phi')}{\sqrt{\sin(\beta + \delta)} + \sqrt{\frac{\sin(\phi' + \delta) \sin(\phi' - i)}{\sin(\beta - i)}}} \right]^2 \quad (2.11)$$

sendo:

β - inclinação do paramento com a horizontal;

ϕ' - ângulo de resistência ao corte do solo;

δ - ângulo de atrito solo-estrutura;

i - inclinação da superfície do terreno.

2.3 Tipos de muros de suporte

Os tipos de muros de suporte mais comuns são os muros de gravidade e em consola (em L ou T invertido, com ou sem contraforte), com ou sem tirantes (EM 1110-2-2502). Assim, apresentam-se, na presente secção, algumas considerações acerca das referidas estruturas.

2.3.1 Muros de gravidade

Os muros de gravidade são estruturas de suporte de terras em que o seu peso próprio se revela no principal elemento responsável pela sua estabilidade. São, geralmente, utilizados em locais onde o solo apresenta boas capacidades resistentes (Domingues, 1997). Este tipo de muros pode ser construído em alvenaria ou betão (simples ou armado), com gabiões ou pneus usados. Apresentam-se alguns exemplos (de uma vasta gama) deste tipo de muros, seu tipo de secção e dimensões vulgarmente utilizadas.

De acordo com Cernica (1994), a geometria corrente para este tipo de muro é do tipo da ilustrada na Figura 2.5.

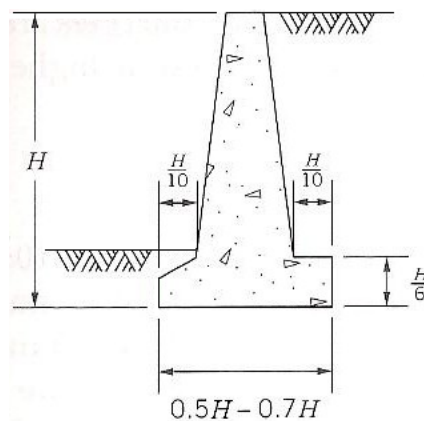


Figura 2.5: Geometria de muros de gravidade (Cernica, 1994).

No entanto, Domingues (1997) apresenta três perfis básicos para o projecto de muros de gravidade: rectangular, trapezoidal e em escada.

Domingues refere que o muro de gravidade com perfil rectangular é económico para alturas até 2 metros e geralmente concebido em betão ciclópico. Na Figura 2.6 encontra-se uma ilustração deste tipo de muro.

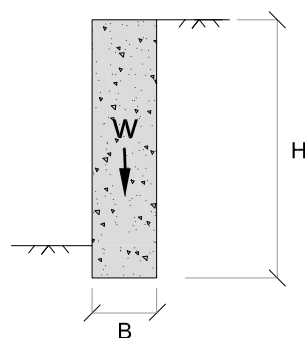


Figura 2.6: Muro de gravidade com perfil rectangular (adaptado de Domingues (1997)).

Onde:

H - altura total do muro;

B - largura da base;

W - peso próprio do muro.

Segundo Moliterno (1980) (citado por Domingues (1997)), podem ser adoptadas, para o pré-dimensionamento dos muros de gravidade com secção rectangular, as dimensões presentes na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Dimensões para o pré-dimensionamento (Moliterno, 1980).

Tipo de estrutura	Dimensão
Muro em alvenaria de tijolo	$B = 0,4H$
Muro de betão ciclópico	$B = 0,3H$

Domingues apresenta os muros de gravidade com perfil trapezoidal como sendo mais económicos face aos de perfil rectangular e aplicáveis para alturas superiores (até 4 metros). São construídos mediante o preenchimento de uma forma pré-definida com betão e rochas de dimensões variadas. Assim, apresenta-se, na Figura 2.7, a geometria proposta por Moliterno (1980), destacando-se a face externa da parede do muro inclinada, fazendo com que o centro de gravidade se situe do lado do terreno suportado.

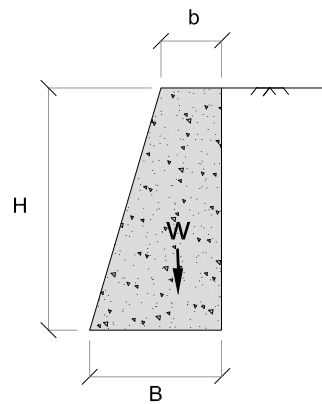


Figura 2.7: Muro de gravidade com perfil trapezoidal (adaptado de Domingues (1997)).

Moliterno (1980) apresenta as seguintes dimensões a considerar para o pré-dimensionamento de muros com perfil trapezoidal:

$$b = 0,14H \quad (2.12)$$

$$B = b + \frac{H}{3} \quad (2.13)$$

Os muros com perfil em escada, de construção em alvenaria de pedra, são também analisados por Domingues, que os apresenta como aplicáveis nas mesmas situações que os de perfil trapezoidal mas revelando-se mais económicos, ao nível dos materiais. Assim, ilustra-se, na Figura 2.8, a geometria do tipo de muros em questão.

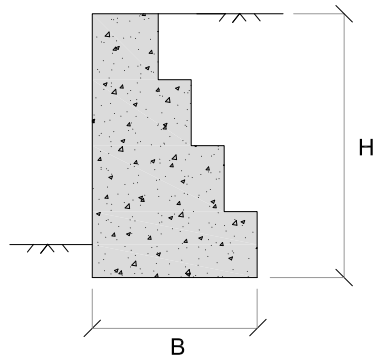


Figura 2.8: Muro de gravidade com perfil em escada (adaptado de Domingues (1997)).

Os muros de gabiões consistem num elemento estrutural que também funciona por gravidade.

São constituídos por caixas metálicas, com forma paralelepípedica, executadas com fios em aço galvanizado em forma hexagonal, como ilustrado na Figura 2.9 (aberturas com dimensões inferiores ao diâmetro das pedras menores), revestidos com uma camada de PVC que proporciona uma elevada eficiência contra a acção de intempéries, águas e solos agressivos (BS 8002:1994 (2002)). Posteriormente, são preenchidas manualmente (de modo a criar o menor volume de vazios possível) com pedras de dimensões reduzidas, até 20 cm (BS 8002:1994 (2002)).

Neste tipo de estruturas deverão ser, segundo Mascarenhas (2002), utilizadas pedras de granito em detrimento das de calcário, devido à expansão destas últimas quando húmidas, provocando deformações nas gaiolas de rede (Aguiar e Martins (2005)).

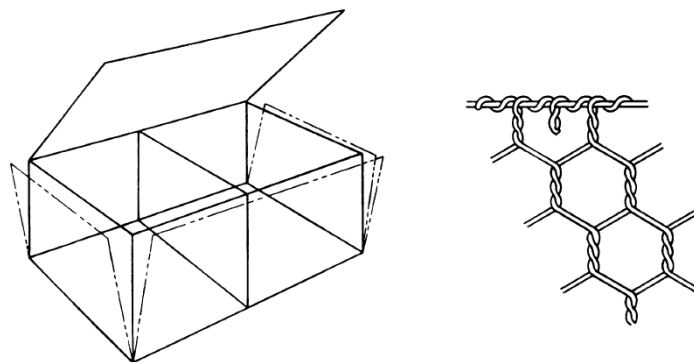


Figura 2.9: Tipologia das gaiolas e geometria da malha (BS 8002:1994 (2002)).

A geometria dos muros de gabiões é variada, sendo as mais correntes as apresentadas na Figura 2.10.

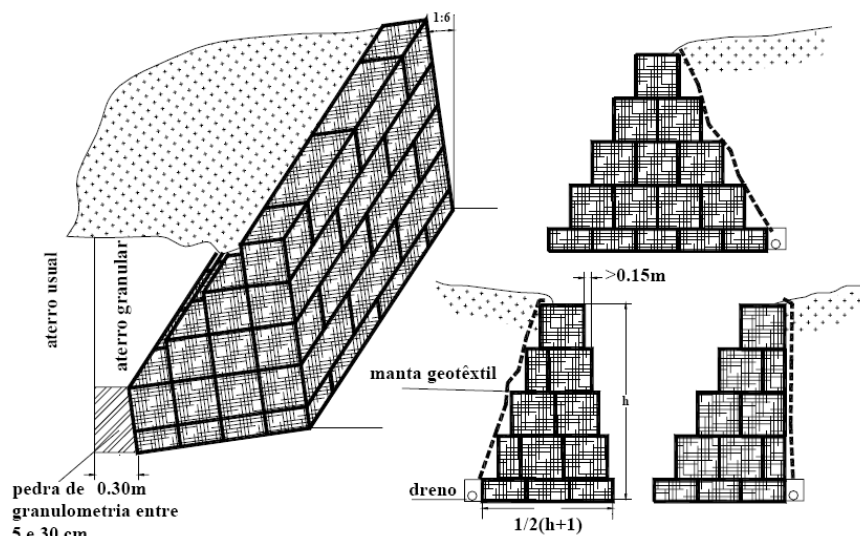


Figura 2.10: Muro de gabiões (Aguiar e Martins, 2005).

A sua principal vantagem sobre outros reside na sua elevada permeabilidade, altamente drenante e flexibilidade que induz numa capacidade de sofrerem deslocamentos e deformações sem se romperem.

O seu uso é essencialmente implementado em vias rodoviárias devido ao seu bom enquadramento paisagístico (Maccaferri, 2003).

Os muros de pneus são estruturas relativamente pouco usuais. No entanto, revela-se interessante a sua observação, uma vez que revelam um baixo custo quando comparados com os materiais convencionais. Apresentam-se como muros de gravidade e são construídos através de pneus usados, dispostos horizontalmente, amarrados entre si com corda ou arame e preenchidos com solo compactado. Devido à elevada flexibilidade do material, este tipo de muros permite deslocamentos horizontais e verticais superiores aos construídos em betão ou alvenaria. No entanto, e por esse facto, não deverão ser aplicáveis em contenções que sirvam de suporte a estruturas pouco deformáveis, como fundações ou vias ferroviárias.

Segundo Gerscovich (2006), este tipo de muro está limitado a alturas inferiores a 5 metros e a base deverá ser na ordem dos 40 a 60% da altura do mesmo.

2.3.2 Muros em consola

Os muros em consola são estruturas esbeltas, regularmente com secção transversal em L ou em T invertido e que diferem dos muros de gravidade por resistirem aos impulsos de terras por flexão. Para tal, existe a necessidade de se calcular as armaduras da sapata e da parede, tendo especial atenção na ligação entre eles. Neste tipo de muros, poder-se-á considerar o uso de parte do peso próprio do maciço suportado, apoiado sobre a base, por forma a garantir um maior equilíbrio do mesmo.

A geometria deste tipo de muros é sugerida por Cernica (1994) e ilustrada na Figura 2.11.

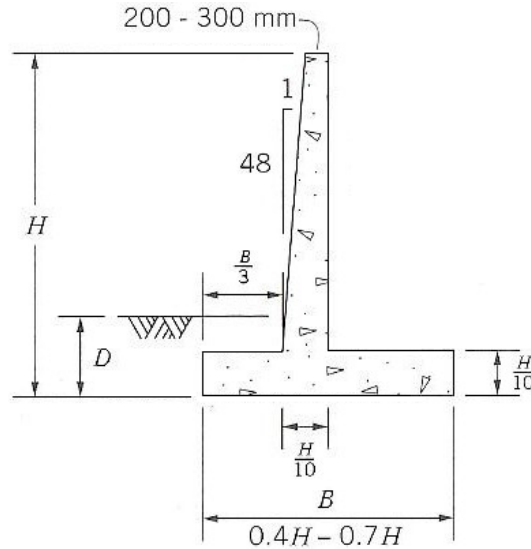


Figura 2.11: Geometria de muros em consola (Cernica, 1994).

A estes muros podem ser adicionadas ancoragens, por forma a aumentar a sua resistência ao deslizamento. Esta solução pode ser aplicada quando existem limitações de espaço disponível e existe um terreno com elevadas características resistentes na fundação. As ancoragens podem localizar-se na base (Figura 2.12a) ou no topo do muro (Figura 2.12b), estando, neste último caso, fixadas a uma placa de ancoragem (Domingues, 1997).

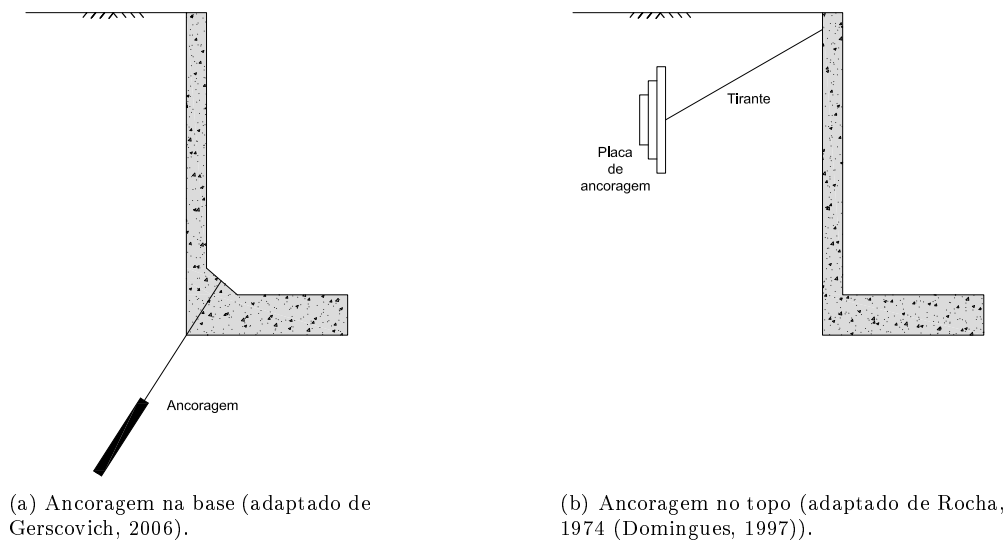


Figura 2.12: Representação de muro com ancoragens.

Salienta-se que, no decorrer da presente dissertação, abordar-se-ão os impulsos sobre muros de suporte em consola (em *L* ou *T* invertido).

2.4 Impulsos activos sobre estruturas de suporte em *L* ou *T* invertido

Para o cálculo de impulsos activos sobre muros em *L* ou *T* invertido, é necessário definir, como em todos os casos, a teoria de cálculo de impulsos a usar (Rankine ou Coulomb). É essencial definir

também a localização da superfície que define o paramento virtual, isto é, a localização do plano em que se encontram aplicados os impulsos.

2.4.1 Método baseado na teoria de Rankine (Método R) (Terzaghi et al., 1948)

O método R considera que a superfície que define o paramento virtual é vertical (Figura 2.13) e que a teoria de Rankine é a usada para o cálculo dos impulsos activos actuantes.

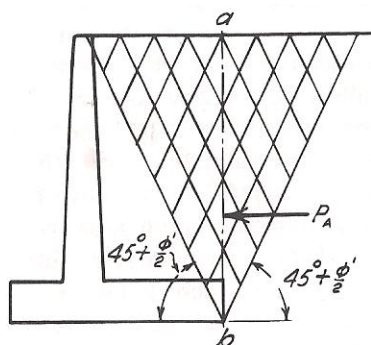


Figura 2.13: Superfície de ruptura: Estado activo (Terzaghi et al., 1948).

O impulso actuante na estrutura é representado por um diagrama de tensões triangular (as tensões variam linearmente com a profundidade), estando o ponto de aplicação da sua resultante localizado a $\frac{1}{3}$ da profundidade H' (Terzaghi et al., 1948), ao ser considerada a inclinação da superfície do terreno suportado (Figura 2.14).

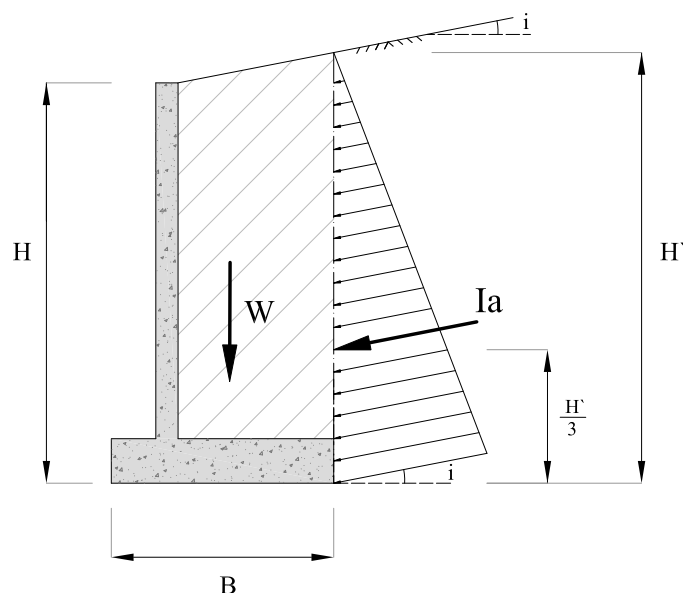


Figura 2.14: Representação esquemática do método baseado na teoria de Rankine - método R (adaptado de Terzaghi et al., 1948).

A expressão 2.6, apresentada na secção 2.2.1 caracteriza o impulso activo.

Na Figura 2.14, o peso total da estrutura, dado por W , engloba, para além do peso próprio do muro, o peso correspondente ao solo presente na cunha que juntamente com aquele se move, delimitada pelo tardo e base daquele e pela superfície que define o paramento, vertical.

2.4.2 Método baseado no método de Coulomb (Método C_1) (Mineiro, 1978)

O método C_1 adopta um paramento virtual com uma inclinação β_{C1} , função da altura H e do comprimento da base B da estrutura (Figura 2.15). Para o cálculo dos impulsos activos actuantes, no método C_1 é utilizada a formulação do método de Coulomb.

O peso do muro, aliado ao solo contido no vulgarmente denominado “muro virtual”, limitado pela parede e base da estrutura e pela superfície de rotura, constituem o peso total W . Juntamente com a componente vertical do impulso actuante, representam as cargas verticais.

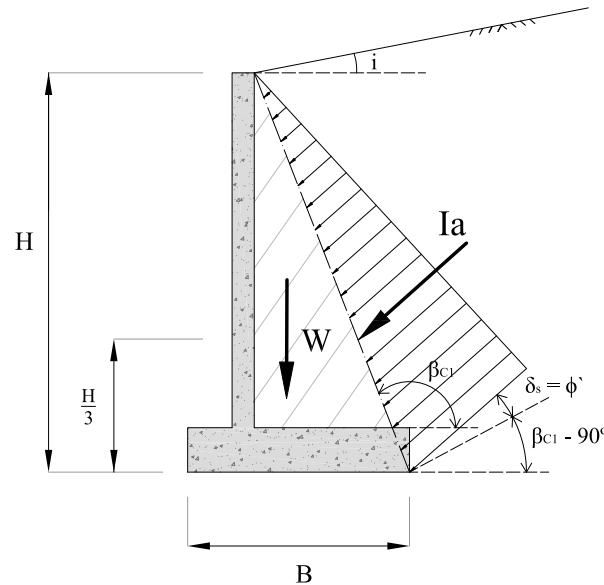


Figura 2.15: Representação esquemática do método baseado no método de Coulomb - método C_1 .

Na Figura 2.15, ilustra-se o método C_1 , destacando-se a localização do ponto de aplicação do impulso a $\frac{1}{3}$ da altura do diagrama de tensões, admitido triangular, dado que as tensões presentes variam linearmente com a profundidade do terreno. A resultante que actua no tardo da parede da estrutura faz um ângulo δ_s com a superfície que define o paramento virtual (Figura 2.15). Esse ângulo, que representa o atrito presente na interface solo-estrutura, é igual ao ângulo de resistência ao corte do solo ϕ' , pois, na verdade, o contacto dá-se entre solo e solo. A expressão 2.10, presente na secção 2.2.2, caracteriza o impulso activo.

2.4.3 Método baseado no método de Coulomb (Método C_2) (Matos Fernandes et al., 1997)

O assunto do cálculo rigoroso dos impulsos sobre muros de suporte em consola tem sido abordado por diversos autores como Barghouthi (1990), Greco (1992; 1999; 2001), Matos Fernandes et al. (1997) e Matos Fernandes (2011).

Para o presente trabalho, considera-se como método C_2 , o descrito por Matos Fernandes et al. (1997), por se julgar que o problema (e a metodologia para o resolver) é colocado por estes autores na forma mais directa. Como se verá, os restantes trabalhos introduzem alguns esclarecimentos adicionais, pelo que também são abordados.

O método proposto por Matos Fernandes et al. (1997) procura testar todas as superfícies planas, compostas ou não, de separação entre a cunha de terreno que actua solidariamente com o muro e o maciço suportado, utilizando, para o cálculo dos impulsos activos, as expressões de Coulomb.

Na Figura 2.16 indica-se a inclinação admitida para a resultante do impulso em cada um dos troços da superfície que define o paramento virtual do muro.

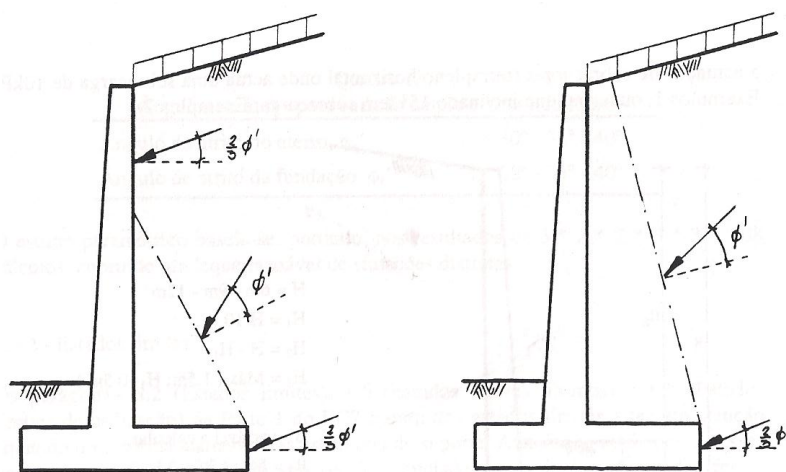
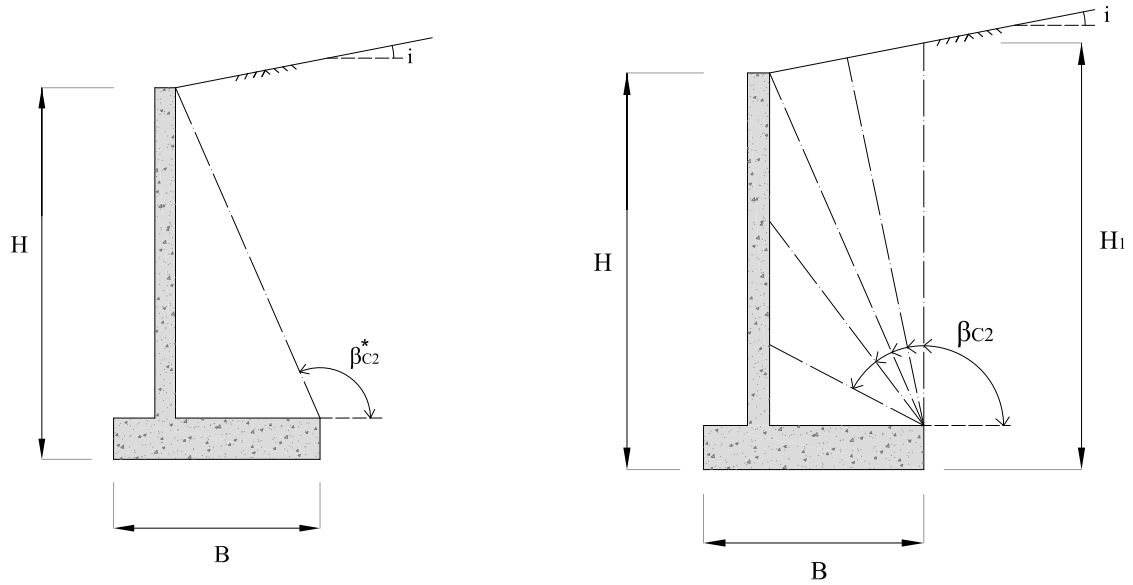


Figura 2.16: Método de avaliação dos impulsos em muros de betão armado (Matos Fernandes et al. (1997)).

No método C_2 considera-se, assim, que a superfície que define o paramento virtual é uma superfície quebrada, em 2 ou 3 troços, consoante o valor do ângulo β_{C2} (Figura 2.17b). Com efeito, caso o ângulo β_{C2} seja inferior ao ângulo β_{C2}^* (β_{C2}^* ilustrado na Figura 2.17a), o paramento do muro é composto por 2 troços (Figura 2.18a). No caso de β_{C2} ser superior a β_{C2}^* , o paramento tem 3 troços (Figura 2.18b). Em qualquer dos casos, utiliza-se a teoria de Coulomb para a determinação dos impulsos activos. O contacto entre a superfície que define o paramento do muro “virtual” e o solo é caracterizado pelo ângulo de atrito solo-solo, ou seja, ϕ' .

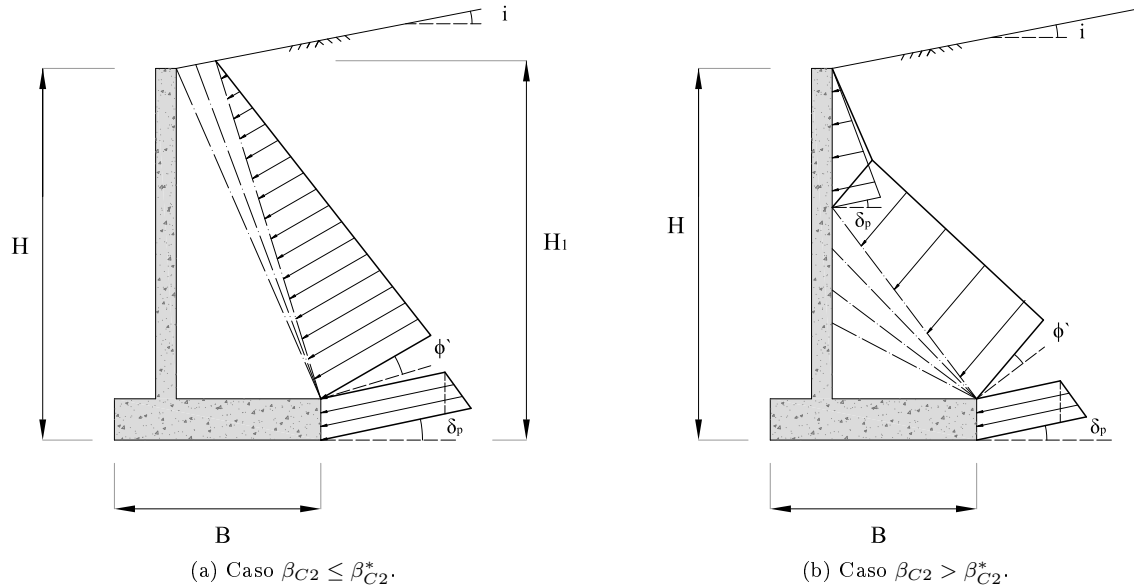


(a) Representação da inclinação fixa do paramento, β_{C2}^* .

(b) Variação da inclinação do paramento, β_{C2} .

Figura 2.17: Representação esquemática do método C_2 : inclinação do paramento virtual do muro.

A partir dos impulsos resultantes do método de Coulomb, pode inferir-se o diagrama de tensões sobre a estrutura que aumenta linearmente com a profundidade em cada troço, conforme ilustrado na Figura 2.18. A escolha de β_{C2} é feita por forma a maximizar o impulso activo (ou a sua componente horizontal ou a obtenção da situação menos estável da estrutura de suporte, nomeadamente, o deslizamento, o derrubamento, a rotura da fundação, etc.).



(a) Caso $\beta_{C2} \leq \beta_{C2}^*$.

(b) Caso $\beta_{C2} > \beta_{C2}^*$.

Figura 2.18: Representação esquemática do método C_2 : diagramas de tensões.

A abordagem de Barghouthi (1990) e Greco (1992; 1999; 2001) difere desta em dois aspectos:

- tem como preocupação fundamental determinar os impulsos sobre a superfície vertical definida aquando da apresentação do método R ; tal preocupação é interessante na medida em que intro-

duz esclarecimentos adicionais à solução obtida do método C_2 ;

- ignora a parte habitualmente vertical da base do muro, isto é, admite que as superfícies a analisar partem do ponto A e não do ponto A', indicados na Figura 2.19.

A análise do problema, tal como foi colocado por estes autores, foi resumida por Matos Fernandes (2011): Nos casos em que $\beta'_B < \beta_B^*$, o muro ao deslocar-se, mobiliza o estado activo nas cunhas ABC e ACD (Figura 2.19). Os ângulos β'_B e β_B são definidos pelas expressões apresentadas por Barghouthi (1990):

$$\beta'_B = 180^\circ - \left[45^\circ + \frac{\phi'}{2} + \frac{\varepsilon - i}{2} \right] \quad (2.14)$$

$$\beta_B = 45^\circ + \frac{\phi'}{2} - \frac{\varepsilon - i}{2} \quad (2.15)$$

em que ε é dado pela seguinte expressão:

$$\varepsilon = \arcsin \left(\frac{\sin i}{\sin \phi'} \right) \quad (2.16)$$

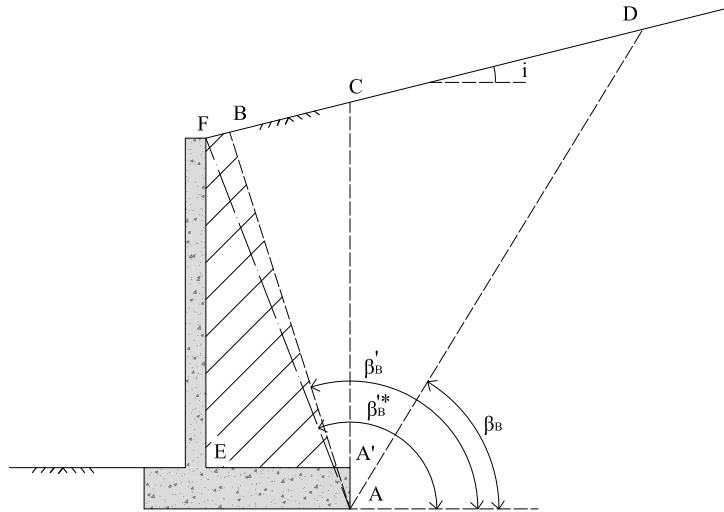


Figura 2.19: Muro em consola e cunhas de terras em estado activo (adaptado de Matos Fernandes, 2011).

Quando a inclinação da superfície do terreno suportado é nula, os dois ângulos apresentados, β_B e β'_B , são iguais a $\pi/4 + \phi'/2$ (Barghouthi, 1990).

O impulso (Figura 2.20a) pode ser calculado ao longo da superfície AB usando a solução analítica de Coulomb. Equilibrando a cunha ABC considerando o impulso I_a^{AB} , já calculado (pela solução de Coulomb), e o peso do solo W_{ABC} , obter-se-á o impulso I_a^{AC} na superfície AC (Figura 2.20b). O impulso I_a^{AC} é o impulso activo de Rankine. Este resultado introduz, assim, esclarecimento sobre as soluções que são de esperar pela aplicação do método C_2 , para o caso $\beta_{C2} < \beta_{C2}^*$.

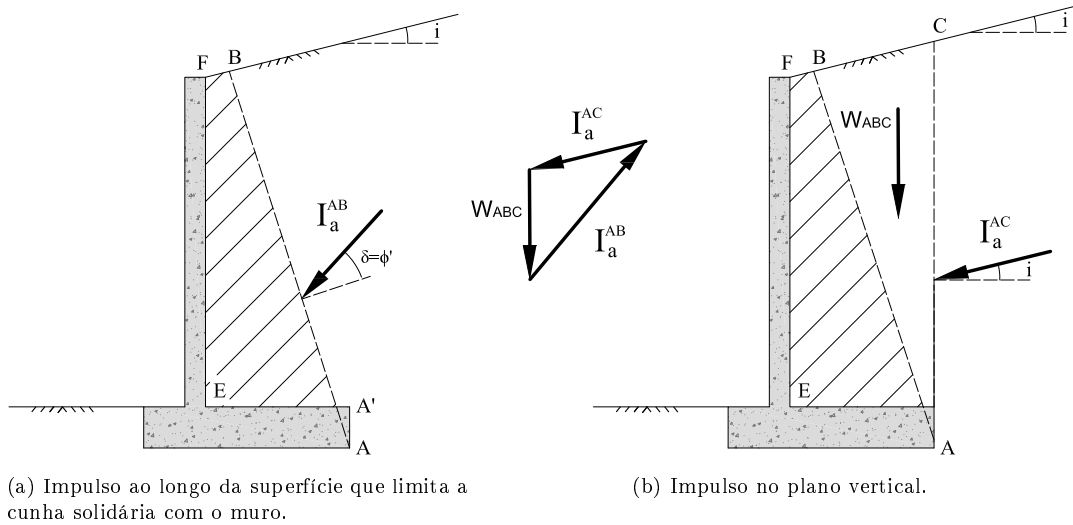


Figura 2.20: Avaliação do impulso activo em muros em consola. Caso em que a superfície que define o paramento se encontra acima do topo do muro (adaptado de Matos Fernandes, 2011).

No caso de $\beta'_B > \beta_B^*$, o cálculo do impulso torna-se mais complexo porque a superfície AB intersecta o parede do muro (Figura 2.21a). O procedimento de cálculo sugerido por Matos Fernandes (2011) passa por adoptar um valor para o ângulo β'_B (β_B mantém a sua expressão) fixando a posição do ponto B e calculando, de seguida, os impulsos activos nos troços AB e BF, através do método de Coulomb. Com os impulsos e considerando o peso do solo do bloco ABFC e seguindo o processo anterior (equilíbrio de forças), calcula-se a força na superfície AC (Figura 2.21b). Repetem-se os passos referidos, com novos valores de β'_B de modo a encontrar o valor máximo da força na superfície AC, que, para esse valor do ângulo, será o impulso activo. Como se vê e como se referiu, o ênfase nesta abordagem está na determinação dos impulsos na superfície vertical o que é equivalente à abordagem do método C_2 .

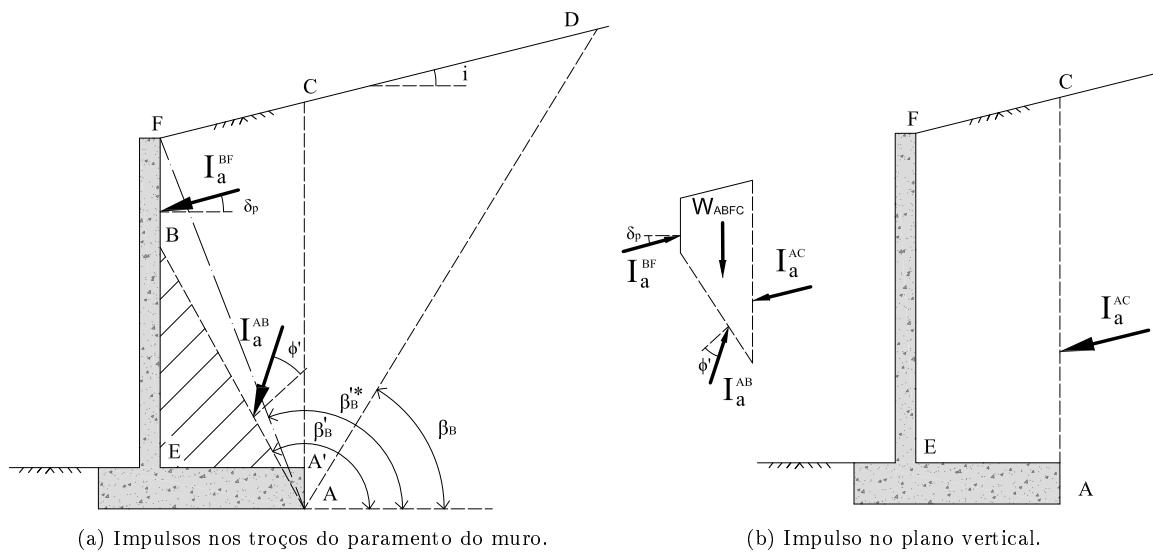


Figura 2.21: Avaliação do impulso activo em muros em consola. Caso em que a superfície que define o paramento se encontra abaixo do topo do muro (adaptado de Matos Fernandes, 2011).

Refere-se ainda que o impulso I_a^{AC} , é, no máximo, o impulso de Rankine (caso $\beta'_B = \beta'^*_B$) e é, no mínimo, o impulso de Coulomb (caso de base com comprimento pequeno). Conclui-se, portanto, que, se $\delta \geq i$, a adoção de I_a^{AC} igual ao impulso de Rankine está do lado da segurança.

Refere-se, finalmente, que Matos Fernandes (2011) considera, na sua leitura dos métodos de Barghouthi (1990) e Greco (1992; 1999; 2001), que os ângulos β'_B e β_B partem do ponto A' (Figuras 2.19 a 2.21) e não do ponto A, conforme considerado nas figuras referidas e pelos autores indicados. Essa leitura aproxima o significado de β'_B ao de β_{C2} e constitui a melhor opção, na medida em que reduz o problema à determinação dos impulsos sobre a estrutura acima de A'. Com efeito, o impulso entre A' e A é conhecido, podendo ser determinado pelo método de Coulomb.

Capítulo 3

Análise de estruturas de suporte em L

3.1 Introdução

No Capítulo 2 apresentaram-se métodos para calcular os impulsos activos sobre estruturas de suporte em L ou T invertido. No presente capítulo aplicam-se os referidos métodos, comparando-os posteriormente.

Salienta-se o facto de, nas aplicações consideradas, não se encontrar presente qualquer tipo de sobrecarga na superfície do terreno suportado.

A estrutura de suporte considerada é ilustrada na Figura 3.1, onde se expõem as dimensões necessárias para a definição da sua geometria.

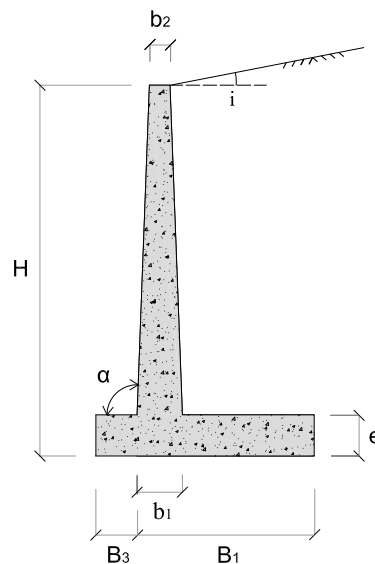


Figura 3.1: Representação das dimensões gerais da estrutura de suporte.

3.2 Definição da estrutura de suporte

A Figura 3.2b indica dimensões secundárias, isto é, dimensões que podem ser escritas em função das principais (indicadas na Figura 3.2a).

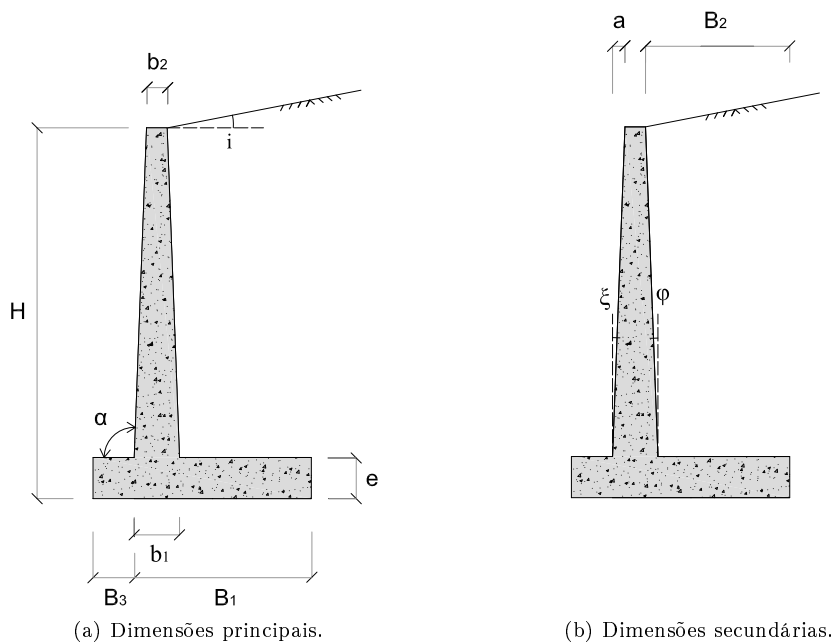


Figura 3.2: Representação das dimensões do modelo adoptado.

As dimensões apresentadas na Figura 3.2b são função das ilustradas na Figura 3.2a através das seguintes expressões:

$$B_2 = B_1 - (a + b_2) \quad (3.1)$$

$$a = (H - e) \tan \xi \quad (3.2)$$

$$\xi = \alpha - 90^\circ \quad (3.3)$$

$$\varphi = \arctan \left(\frac{B_2 - (B_1 - b_1)}{H - e} \right) \quad (3.4)$$

No presente trabalho, os ângulos ξ e φ são considerados nulos, tomando α o valor de 90° . Por conseguinte, as dimensões b_1 e b_2 são iguais. A dimensão B_3 é considerada nula, alterando o muro para uma estrutura de suporte em L.

3.3 Cálculo dos impulsos sobre a estrutura de suporte

3.3.1 Método R

Para a aplicação do método R, a estrutura de suporte (Figura 3.3), definida pelo paramento vertical, tem altura H' , dada por:

$$H' = H + B_2 \tan i \quad (3.5)$$

sendo B_2 dado pela expressão 3.1.

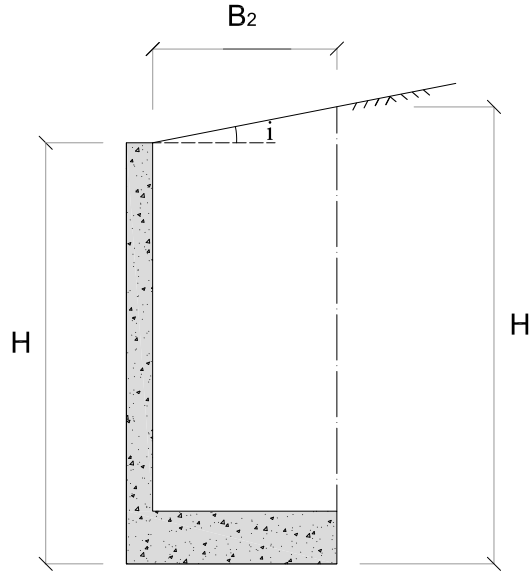


Figura 3.3: Representação das considerações do método *R*.

Como se viu, o método *R* considera a teoria de Rankine, pelo que, da equação 2.6, se obtém uma componente horizontal do impulso activo, dada por:

$$I_a^H = \frac{1}{2} K_a \gamma (H')^2 \cos i = \frac{1}{2} K_a \gamma (H + B_2 \tan i)^2 \cos i \quad (3.6)$$

Com o coeficiente de impulso activo K_a dado pela equação 2.7.

De modo a adimensionalizar o impulso activo, em função dos parâmetros iniciais da estrutura e do terreno, reescreve-se a equação 3.6 da seguinte forma:

$$\frac{I_a^H}{\frac{1}{2} \gamma H^2} = \frac{\frac{1}{2} K_a \gamma (H + B_2 \tan i)^2}{\frac{1}{2} \gamma H^2} \cos i = K_a \left(1 + \frac{B_2}{H} \tan i \right)^2 \cos i \quad (3.7)$$

3.3.2 Método C_1

Para a aplicação do método C_1 , o paramento virtual do muro é considerado com uma inclinação β_{C1} face à horizontal (Figura 3.4), cuja expressão é dada por:

$$\beta_{C1} = 90^\circ + \arctan \left(\frac{B_2}{H} \right) \quad (3.8)$$

$$\theta_{C1} = \arctan \left(\frac{B_2}{H} \right) \quad (3.9)$$

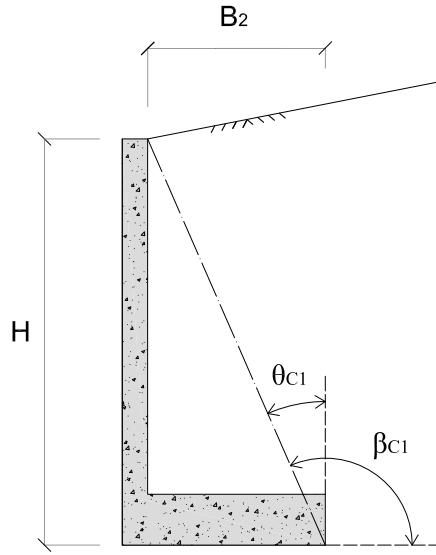


Figura 3.4: Representação das considerações do método C_1 .

O método C_1 considera o método de Coulomb para o cálculo dos impulsos activos. Assim, aplicando a equação 2.10 ao caso presente tem-se, em função dos parâmetros iniciais:

$$I_a^H = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2 \cos(\theta_{C1} + \phi') \quad (3.10)$$

Onde:

K_a - coeficiente de impulso activo;

γ - peso volúmico do solo;

H - altura total do muro;

θ_{C1} - inclinação do paramento do muro face à vertical;

ϕ' - ângulo de resistência ao corte do solo.

Representando-se a razão adimensional da acção, a equação 3.10 é reescrita da seguinte forma :

$$\frac{I_a^H}{\frac{1}{2}\gamma H^2} = \frac{\frac{1}{2}K_a\gamma H^2}{\frac{1}{2}\gamma H^2} \cos(\theta_{C1} + \phi') = K_a \cos(\theta_{C1} + \phi') = K_a \cos\left(\arctan\left(\frac{B_2}{H}\right) + \phi'\right) \quad (3.11)$$

com o ângulo θ_{C1} dado pela expressão 3.9 e em que o coeficiente de impulso activo K_a é dado pela expressão 2.11 (secção 2.2.2), sendo o ângulo β_{C1} presente dado pela expressão 3.8. Deste modo, procura-se conhecer a influência do crescimento da relação $\frac{B_2}{H}$ na expressão do impulso activo.

3.3.3 Método C_2

O método C_2 respeita os parâmetros propostos pelo método de Coulomb e, por tal, a expressão que define o cálculo do impulso activo é dada pela expressão 2.10, apresentada na secção 2.2.2. No entanto, para a sua aplicação, o paramento virtual do muro é considerado com uma inclinação variável (Figura 3.5), de acordo com o descrito na secção 2.4.3. A inclinação fixa, em relação à horizontal e vertical, do paramento do muro é dada por β_{C2}^* e θ_{C2}^* , respectivamente, sendo as suas expressões dadas por:

$$\beta_{C2}^* = 90^\circ + \arctan\left(\frac{B_2}{H - e}\right) \quad (3.12)$$

$$\theta_{C2}^* = \arctan\left(\frac{B_2}{H - e}\right) \quad (3.13)$$

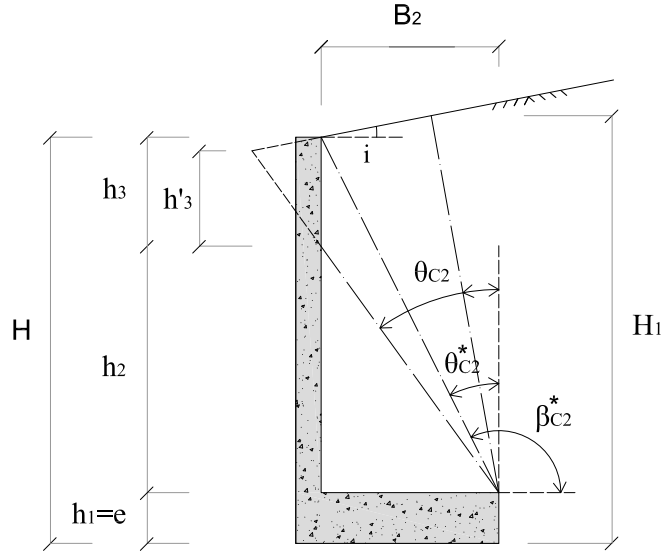


Figura 3.5: Representação das considerações do método C_2 .

As dimensões h_1 , h_2 e h_3 e h'_3 apresentam as seguintes expressões (em função das dimensões iniciais):

$$h_1 = e \quad (3.14)$$

$$h_3 = H - e - [B_2 \tan(90 - \theta_{C2})] \quad (3.15)$$

$$h'_3 = \frac{h_3}{1 + \tan \theta_{C2} \tan i} \quad (3.16)$$

$$h_2 = H - e - h_3 \quad (3.17)$$

A altura H_1 , presente na Figura acima (3.5), revela uma relevante complexidade na sua definição. Por conseguinte, dispõe-se, na Figura 3.6, de um pormenor do muro, juntamente representado com o terreno suportado, com o objectivo de clarificar todas as considerações feitas na apresentação das expressões das grandezas envolvidas.

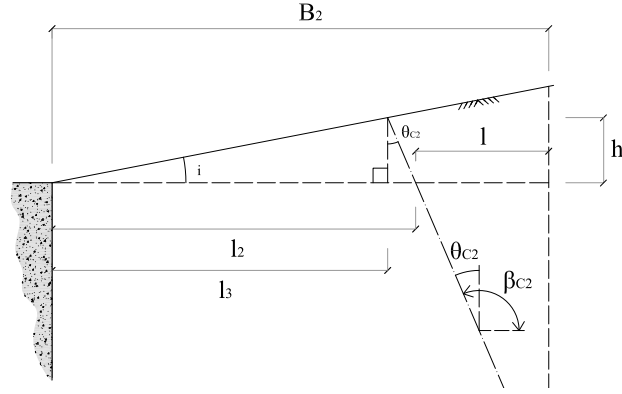


Figura 3.6: Pormenor da representação de grandezas: Método C_2 .

Assim, as dimensões presentes na Figura exposta acima (3.6) têm as seguintes expressões:

$$\tan \theta_{C2} = \frac{l}{H - e} \Rightarrow l = (H - e) \tan \theta_{C2} \quad (3.18)$$

$$l_2 = B_2 - l \quad (3.19)$$

$$\tan i = \frac{h}{l_3} \Rightarrow l_3 = \frac{h}{\tan i} \quad (3.20)$$

$$\tan \theta_{C2} = \frac{l_2 - l_3}{h} \Leftrightarrow \tan \theta_{C2} = \frac{l_2 - \frac{h}{\tan i}}{h} \Rightarrow h \tan \theta_{C2} = l_2 - \frac{h}{\tan i} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow h \left(\tan \theta_{C2} + \frac{1}{\tan i} \right) = l_2 \Rightarrow h = \frac{l_2}{\tan \theta_{C2} + \frac{1}{\tan i}} \quad (3.21)$$

Deste modo, a expressão que origina a altura H_1 é dada por:

$$H_1 = H + h \quad (3.22)$$

O estudo em causa apresenta nuances face ao método C_1 , inerentes à adopção do referido intervalo angular (relembrar secção 2.4.3). Deste modo, a resultante do impulso activo é dada pelo somatório de impulsos parciais, influenciados pela inclinação do paramento do muro, facto demonstrado através da Figura 3.7.

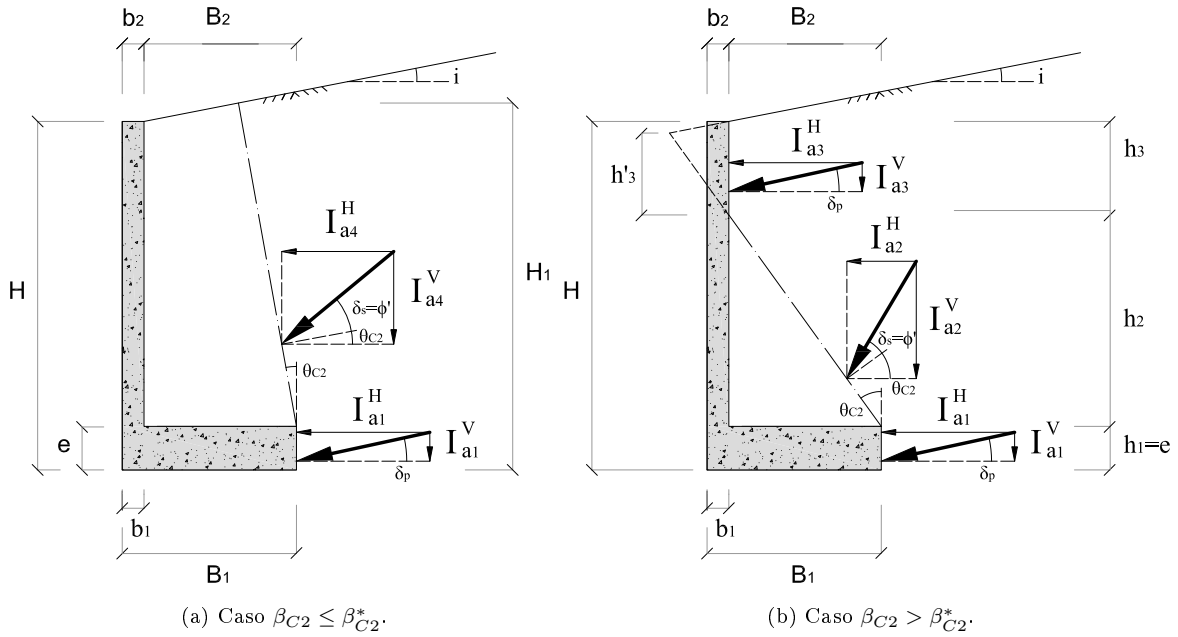


Figura 3.7: Representação dos impulsos parciais: Método C_2 .

No caso em que o paramento do muro se encontra acima da altura H (Figura 3.7a), a resultante do impulso activo é dada por (considerando apenas as componentes horizontais):

$$I_a^H = I_{a1}^H + I_{a4}^H = I_{a1} \cos \delta_p + I_{a4} \cos (\theta_{C2} + \phi') \quad (3.23)$$

Sendo os impulsos parciais presentes na expressão 3.23 calculados de acordo com as seguintes expressões:

$$I_{a1} = K_{a1} \gamma (H - e + B_2 \tan i) e + \frac{1}{2} K_{a1} \gamma e^2 \quad (3.24)$$

$$I_{a4} = \frac{1}{2} K_{a4} \gamma (H_1 - e)^2 \quad (3.25)$$

Assim, é possível reescrever a expressão 3.23, adimensionalizada, da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \frac{I_a^H}{\frac{1}{2} \gamma H^2} &= \frac{I_{a1} \cos \delta_p + I_{a4} \cos (\theta_{C2} + \phi')}{\frac{1}{2} \gamma H^2} = \\ &= \frac{1}{H^2} \left[K_{a1} \left[2 \left(H - e + B_2 \tan i \right) e + e^2 \right] \cos \delta_p + K_{a4} \left[H + \frac{B_2 - (H - e) \tan \theta_{C2}}{\tan \theta_{C2} + \frac{1}{\tan i}} - e \right]^2 \cos (\theta_{C2} + \phi') \right] = \\ &= K_{a1} \left[2 \left(1 - \frac{e}{H} + \frac{B_2}{H} \tan i \right) \frac{e}{H} + \left(\frac{e}{H} \right)^2 \right] \cos \delta_p + K_{a4} \left[1 + \frac{\frac{B_2}{H} - \left(1 - \frac{e}{H} \right) \tan (\beta_{C2} - 90)}{\tan (\beta_{C2} - 90) + \frac{1}{\tan i}} - \frac{e}{H} \right]^2 \cos (\beta_{C2} + \phi' - 90) \end{aligned} \quad (3.26)$$

No caso de o paramento se encontrar abaixo do topo do muro (Figura 3.7b), a resultante do impulso activo é dada por:

$$I_a^H = I_{a1}^H + I_{a2}^H + I_{a3}^H = I_{a1} \cos \delta_p + I_{a2} \cos (\theta_{C2} + \phi') + I_{a3} \cos \delta_p \quad (3.27)$$

Os impulsos parciais presentes na expressão 3.27 são dados pelas seguintes expressões (em função dos parâmetros iniciais):

$$I_{a2} = K_{a2}\gamma h_2 h_3' + \frac{1}{2}K_{a2}\gamma h_2^2 \quad (3.28)$$

$$I_{a3} = \frac{1}{2}K_{a3}\gamma h_3^2 \quad (3.29)$$

sendo I_{a1} calculado através da expressão 3.24.

Os valores relativos aos coeficientes de impulso activo, presentes nas expressões acima, K_{a1} , K_{a2} , K_{a3} e K_{a4} são dados através da expressão 2.11, tendo em consideração que, para K_{a1} e K_{a3} , o ângulo β , presente nas suas expressões, assume o valor de 90° , dado que o paramento do muro é vertical, tendo K_{a2} e K_{a4} valores variáveis, consoante a inclinação do plano que define aquele paramento.

Assim, a expressão que adimensionaliza a acção é dada por:

$$\begin{aligned} \frac{I_a^H}{\frac{1}{2}\gamma H^2} &= \frac{I_{a1} \cos \delta_p + I_{a2} \cos(\theta_{C2} + \phi') + I_{a3} \cos \delta_p}{\frac{1}{2}\gamma H^2} = \\ &= \frac{[(K_{a1}\gamma(H-e+B_2 \tan i) + \frac{1}{2}K_{a1}\gamma e^2) \cos \delta_p] + [(K_{a2}\gamma h_2 h_3 + \frac{1}{2}K_{a2}\gamma h_2^2) \cos(\theta_{C2} + \phi')] + [(\frac{1}{2}K_{a3}\gamma h_3^2) \cos \delta_p]}{\frac{1}{2}\gamma H^2} = \\ &= \frac{\frac{1}{2}\gamma [[(2K_{a1}(H-e+B_2 \tan i)e + K_{a1}e^2) \cos \delta_p] + [(2K_{a2}h_2 h_3 + K_{a2}h_2^2) \cos(\theta_{C2} + \phi')] + [(K_{a3}h_3^2) \cos \delta_p]]}{\frac{1}{2}\gamma H^2} = \\ &= \frac{1}{H^2} [(2K_{a1}(H-e+B_2 \tan i)e + K_{a1}e^2) \cos \delta_p] + [(2K_{a2}h_2 h_3 + K_{a2}h_2^2) \cos(\theta_{C2} + \phi')] + [(K_{a3}h_3^2) \cos \delta_p] = \\ &= \frac{1}{H^2} \left[K_{a1} \left[2(H-e+B_2 \tan i)e + e^2 \right] \cos \delta_p + \right. \\ &\quad \left. + K_{a2} \left[2(B_2 \tan(90 - \theta_{C2})(H-e-B_2 \tan(90 - \theta_{C2}))) + (B_2 \tan(90 - \theta_{C2}))^2 \right] \cos(\theta_{C2} + \phi') + \right. \\ &\quad \left. + K_{a3} \left[H-e-B_2 \tan(90 - \theta_{C2}) \right]^2 \cos \delta_p \right] = \\ &= K_{a1} \left[2\frac{e}{H} \left(1 - \frac{e}{H} + \frac{B_2}{H} \tan i \right) + \left(\frac{e}{H} \right)^2 \right] \cos \delta_p + K_{a2} \left[2\frac{B_2}{H} \tan(180 - \beta_{C2}) \left(1 - \frac{e}{H} \right) - \right. \\ &\quad \left. \left(\frac{B_2}{H} \tan(180 - \beta_{C2}) \right)^2 \right] \cos(\beta_{C2} + \phi' - 90) + \\ &\quad \left. + K_{a3} \left[1 - \frac{e}{H} - \frac{B_2}{H} \tan(180 - \beta_{C2}) \right]^2 \cos \delta_p \right] \quad (3.30) \end{aligned}$$

3.4 Condição de deslizamento

Quando o impulso activo é mobilizado, desenvolve-se, na base da estrutura de suporte, uma força atrítica F_a . Numa situação limite, em que o colapso se revela iminente relativamente ao deslizamento, essa força de atrito terá de ser igual à componente horizontal do impulso gerado, por forma a contrariá-lo. Essa igualdade única àquela componente deve-se ao facto de, no presente estudo, não se encontrarem aplicadas quaisquer outras cargas ou forças com a mesma direcção daquele.

A Figura 3.8 ilustra, genericamente, o referido para o caso, como exemplo, do método R , lembrando-se ao leitor que as dimensões da estrutura são as apresentadas na Figura 3.2. Na mesma Figura (3.8) representam-se as divisões do muro que simplificam o cálculo do seu peso, delegando-se o cálculo do

peso da cunha de solo para cada método em particular, dadas as discrepâncias na definição do plano que define o paramento virtual do muro.

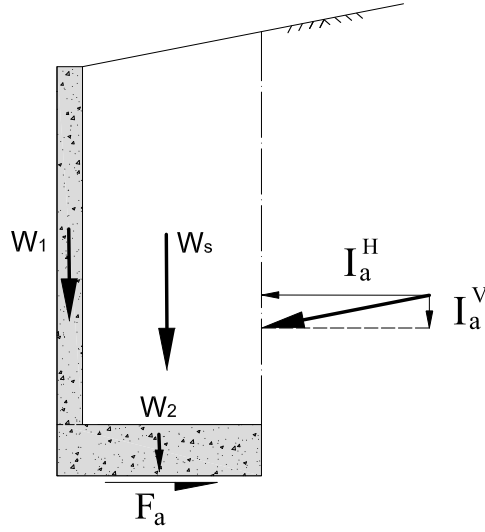


Figura 3.8: Ilustração genérica das principais grandezas envolvidas no estudo da condição de deslizamento: exemplo método R .

O peso total do muro, dado por W_1 e W_2 , aliado ao peso da “cunha morta” W_s , que com aquele se move, juntamente com a componente vertical do impulso activo, dada por I_a^V , constituem a resultante das cargas verticais V .

Os pesos W_1 e W_2 são dados por (relembrando-se que se pretende conhecer a influência da relação $\frac{B_2}{H}$ no estudo):

$$W_1 = b_2 \times (H - e) \gamma_b \quad (3.31)$$

$$W_2 = [(b_1 \times e) + (B_2 \times e)] \gamma_b = \left[(b_1 \times e) + \left(H \times \frac{B_2}{H} \times e \right) \right] \gamma_b \quad (3.32)$$

No decorrer do presente estudo, procura-se definir as expressões das grandezas w_s , I_a^H e I_a^V . Estas são específicas a cada método, devido à dispar consideração da localização e inclinação do paramento virtual do muro. Todavia, a expressão geral que permite calcular a resultante das cargas verticais V é dada por:

$$V = W_1 + W_2 + W_s + I_a^V \quad (3.33)$$

A força atrítica relaciona-se com a resultante das cargas verticais (pormenorizadas no decorrer do estudo, consoante a consideração de cada método) através da seguinte expressão:

$$F_a = V \tan \delta \quad (3.34)$$

Então, numa situação limite, em que a força de atrito é igual à componente horizontal do impulso, é possível escrever a seguinte expressão:

$$F_a = I_a^H \implies V \tan \delta = I_a^H \quad (3.35)$$

A expressão acima pode ser ordenada em função do ângulo de atrito δ , o que origina uma relação fraccionada entre a componente horizontal do impulso activo e as cargas verticais presentes no problema em análise. Por conseguinte, retrata-se a razão adimensional da estabilidade do muro ao deslizamento (condição de deslizamento):

$$\tan \delta = \frac{I_a^H}{V} \quad (3.36)$$

3.4.1 Método R

Tendo por base o método em questão, na Figura 3.9 podem-se observar todas as considerações e grandezas necessárias para a definição do estudo das grandezas envolvidas na determinação da resultante das cargas verticais e da componente horizontal do impulso activo, V e I_a^H respectivamente.

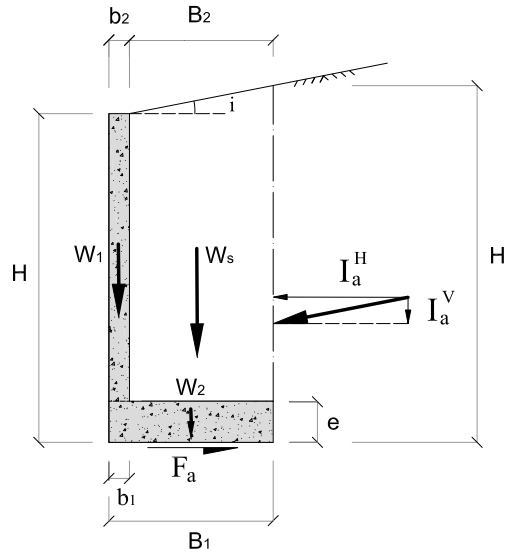


Figura 3.9: Representação de grandezas: método R.

O peso da cunha de solo, dada por W_s , é calculado de acordo com a seguinte expressão (relembrando que se pretende conhecer a influência da relação $\frac{B_2}{H}$ no estudo):

$$\begin{aligned} W_s &= B_2 (H - e) \gamma + \frac{1}{2} B_2 \times B_2 \tan i \times \gamma \implies \\ \implies W_s &= H \left(\frac{B_2}{H} \right) (H - e) \gamma + \left(\frac{1}{2} H \left(\frac{B_2}{H} \right) \times \left(\frac{B_2}{H} \right) H \tan i \right) \gamma \\ \implies W_s &= H \left(\frac{B_2}{H} \right) (H - e) \gamma + H^2 \left(\frac{1}{2} \left(\frac{B_2}{H} \right)^2 \tan i \right) \gamma \end{aligned} \quad (3.37)$$

A componente vertical do impulso é dada pela seguinte expressão (em função dos parâmetros iniciais):

$$\begin{aligned} I_a^V &= \frac{1}{2} K_a \gamma H'^2 \sin i = \frac{1}{2} K_a \gamma [B_2 \tan i + H]^2 \sin i = \frac{1}{2} K_a \gamma \left[H \left(\frac{B_2}{H} \tan i + 1 \right) \right]^2 \sin i \implies \\ \implies I_a^V &= \frac{1}{2} K_a \gamma H^2 \left(\frac{B_2}{H} \tan i + 1 \right)^2 \sin i \end{aligned} \quad (3.38)$$

É possível, então, escrever a seguinte expressão:

$$V = W_1 + W_2 + W_s + \frac{1}{2}\gamma K_a H^2 \left(\frac{B_2}{H} \tan i + 1 \right)^2 \sin i \quad (3.39)$$

No que diz respeito à componente horizontal do impulso activo, esta é dada pela expressão 3.6, presente na secção 3.3.1.

Assim, encontram-se definidas as grandezas presentes na expressão 3.36, de acordo com o método *R*.

3.4.2 Método C_1

Adoptando o método em questão, na Figura 3.10, ilustra-se a força de atrito, a decomposição do impulso activo nas suas componentes horizontal e vertical e a divisão do muro de acordo com a sua geometria com os seus respectivos pesos, bem como da cunha de solo que com o muro se move, com o objectivo de transmitir todas as grandezas envolvidas no decorrer do estudo.

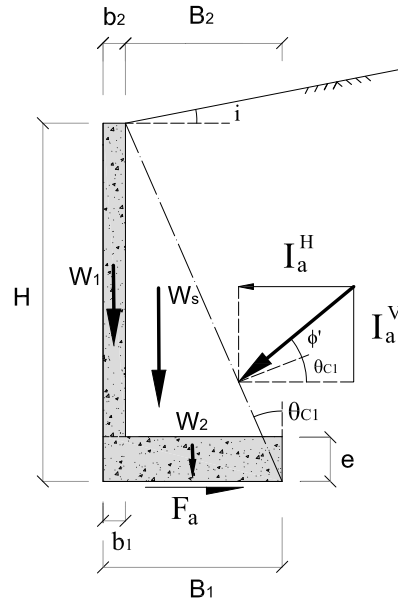


Figura 3.10: Representação de grandezas: método C_1 .

Os pesos W_1 e W_2 são dados através das expressões 3.31 e 3.32, respectivamente, sendo o peso correspondente ao solo na cunha limitada pela superfície que define o paramento virtual do muro:

$$W_s = \left[\left(\left(B_2 \times \frac{B_2}{H} \right) - e \tan \theta_{C1} \right) (H - e) \right] \gamma \quad (3.40)$$

A componente vertical do impulso activo é dada pela expressão:

$$I_a^V = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2 \sin (\theta_{C1} + \phi') \quad (3.41)$$

É possível, então, escrever a seguinte expressão:

$$V = W_1 + W_2 + W_s + \frac{1}{2} \gamma K_a H^2 \sin (\theta_{C1} + \phi') \quad (3.42)$$

sendo a componente horizontal do mesmo impulso dada pela equação 3.10, presente na secção 3.3.2.

Encontram-se, assim, de acordo com o método C_1 , definidas todas as grandezas indispensáveis à expressão 3.36.

3.4.3 Método C_2

No presente método, o impulso, tal como referido em 2.4.3, encontra-se dividido em dois ou três troços, consoante a superfície que define a inclinação do paramento virtual se encontre acima do topo do muro ou abaixo deste, respectivamente. Portanto, a força de atrito referida é, com efeito, contrária ao somatório das componentes horizontais das resultantes dos diagramas que compõe o impulso gerado. O modelo que engloba todas as grandezas necessárias para uma correcta percepção do exposto é detalhadamente apresentado na Figura 3.11.

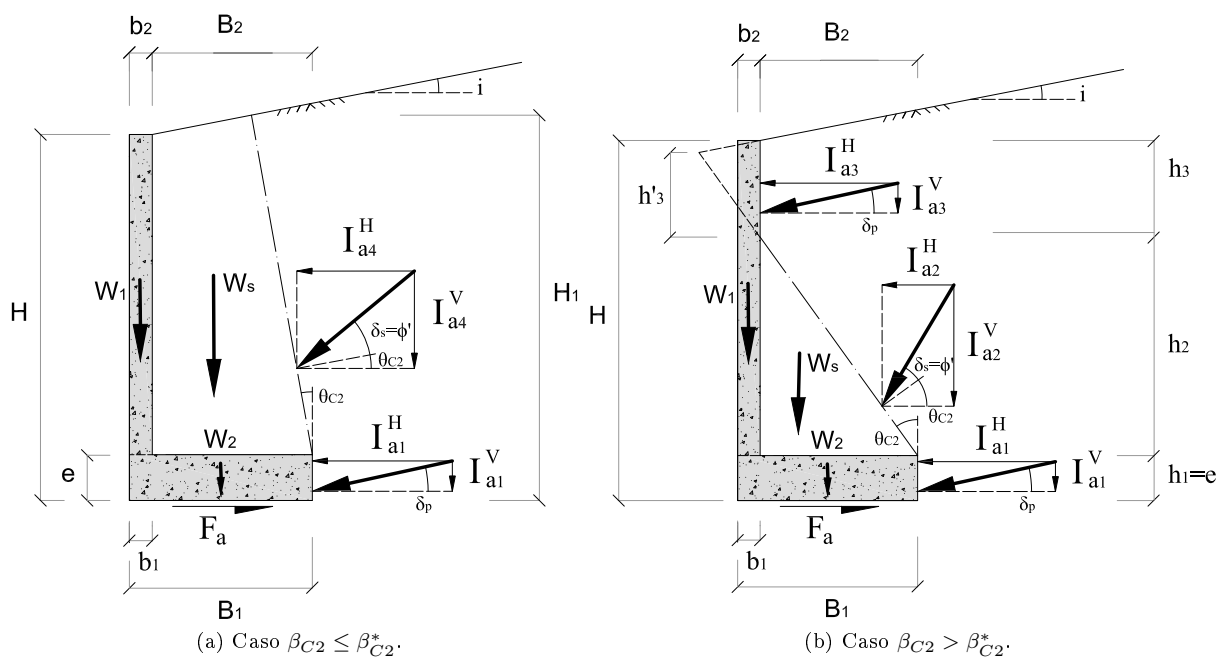


Figura 3.11: Representação de grandezas: método C_2 .

Os pesos W_1 e W_2 são calculados de acordo com as expressões 3.31 e 3.32, respectivamente.

No que diz respeito ao peso relativo ao solo presente na “cunha morta”, a definição da geometria revela uma determinada complexidade, quando a superfície que define a inclinação do paramento virtual se encontra acima do topo do muro. Deste modo, apresenta-se, na Figura 3.12, um pormenor desse caso, com o objectivo de tornar perceptível todas as grandezas inerentes ao cálculo daquele peso.

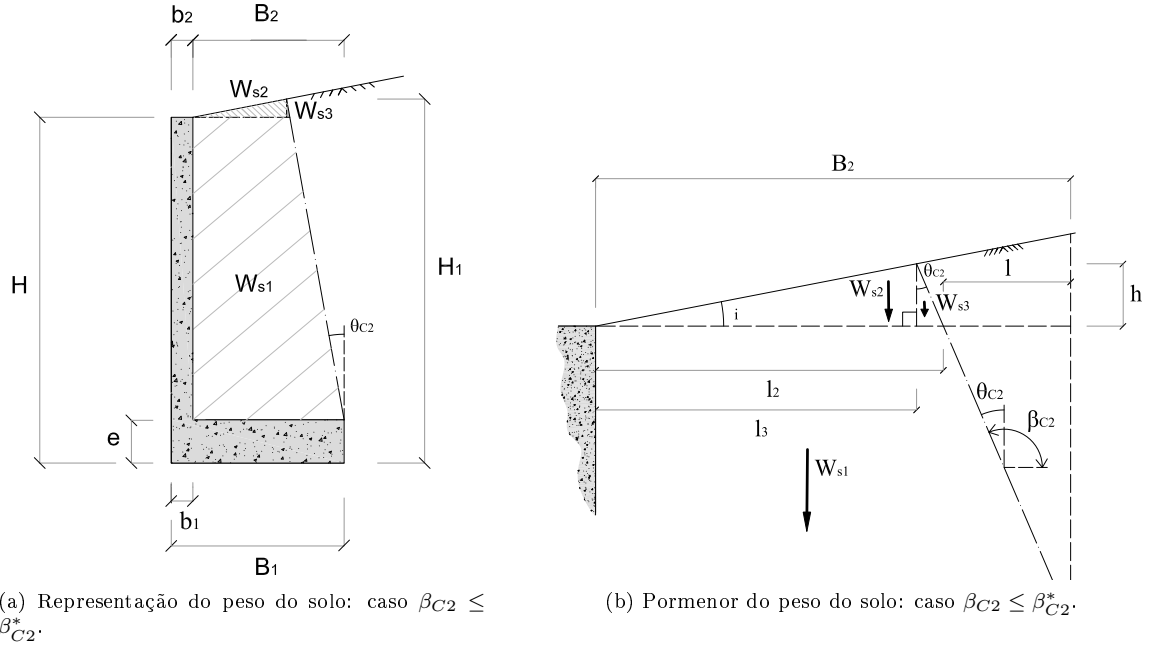


Figura 3.12: Representação do peso presente na cunha de solo: método C_2 .

Assim, lembrando as expressões apresentadas na secção 3.3.3, o peso total do solo, dado por W_s , resulta do somatório dos pesos parciais W_{s1} , W_{s2} e W_{s3} , sendo as expressões relativas a estes dadas por:

$$W_{s1} = \gamma \left[(B_2 (H - e)) - \left(\frac{(H - e)(H - e) \tan \theta_{C2}}{2} \right) \right] \quad (3.43)$$

$$W_{s2} = \frac{l_3 \times h}{2} \gamma \quad (3.44)$$

$$W_{s3} = \frac{(l_2 - l_3) h}{2} \gamma \quad (3.45)$$

A componente vertical da resultante do impulso activo é dada pela expressão:

$$I_a^V = I_{a1}^V + I_{a4}^V = I_{a1} \sin \delta_p + I_{a4} \sin (\theta_{C2} + \phi') \quad (3.46)$$

sendo I_{a1} e I_{a4} calculados através das expressões 3.24 e 3.25, respectivamente.

Assim, é possível escrever a seguinte expressão:

$$\begin{aligned} V = W_1 + W_2 + W_{s1} + W_{s2} + W_{s3} + \frac{1}{2} \gamma K_{a1} \left[2(H - e + B_2 \tan i) e + e^2 \right] \sin \delta_p + \\ + \frac{1}{2} \gamma K_{a4} \left[H + \frac{B_2 - (H - e) \tan (\beta_{C2} - 90)}{\tan (\beta_{C2} - 90) + \frac{1}{\tan i}} - e \right]^2 \sin (\beta_{C2} + \phi' - 90) \end{aligned} \quad (3.47)$$

Por seu lado, a componente horizontal do impulso activo é dada pela expressão 3.23, presente na secção 3.3.3.

Na situação em que a superfície que define o paramento virtual do muro se encontre abaixo do topo deste (Figura 3.11b), o peso do solo W_s é dado pela expressão:

$$W_s = \frac{B_2 \times B_2 \tan(90 - \theta_{C2})}{2} \gamma \quad (3.48)$$

A componente vertical da resultante do impulso activo é dada por:

$$I_a^V = I_{a1}^V + I_{a2}^V + I_{a3}^V = I_{a1} \sin \delta_p + I_{a2} \sin(\theta_{C2} + \phi') + I_{a3} \sin \delta_p \quad (3.49)$$

em que I_{a1} , I_{a2} e I_{a3} são dados, respectivamente, pelas expressões 3.24, 3.28 e 3.29.

Assim, é possível escrever a seguinte expressão:

$$\begin{aligned} V = & W_1 + W_2 + W_s + \frac{1}{2} \gamma K_{a1} \left(2(H - e + B_2 \tan i) e + e^2 \right) \sin \delta_p + \\ & + \frac{1}{2} \gamma K_{a2} \left(2(B_2 \tan(180 - \beta_{C2})(H - e - B_2 \tan(180 - \beta_{C2}))) + (B_2 \tan(180 - \beta_{C2}))^2 \right) \sin(\beta_{C2} + \phi' - 90) + \\ & + \frac{1}{2} \gamma K_{a3} \left(H - e - B_2 \tan(180 - \beta_{C2}) \right)^2 \sin \delta_p \end{aligned} \quad (3.50)$$

A componente horizontal do impulso activo é calculada através da expressão 3.27, disposta na secção 3.3.3.

As grandezas necessárias para a expressão 3.36 encontram-se assim definidas, segundo o método C_2 .

3.5 Análise paramétrica: influência de ϕ' , i e do comprimento da base da estrutura B_1

3.5.1 Impulsos

3.5.1.1 Métodos R e C_1

O estudo em questão é feito tendo por base os parâmetros iniciais apresentados na Tabela 3.1. Assim, todas as restantes dimensões são encontradas a partir daqueles.

Pretende-se, na presente secção, conhecer a influência do comprimento da base da estrutura de suporte, transmitida pela relação B_2/H , nas características do impulso activo horizontal. Salienta-se o facto de todas as dimensões necessárias para uma correcta percepção do modelo de cálculo se encontrarem ilustradas nas Figuras 3.2 e 3.4, presentes nas secções 3.2 e 3.3.2, respectivamente, para o método R e C_1 .

Tabela 3.1: Parâmetros iniciais usados nas análises dos métodos R e C_1 .

Parâmetros iniciais	
$H(m)$	8
$e(m)$	1
$b_1(m)$	0,5
$b_2(m)$	0,5
$\alpha(^{\circ})$	90
$\gamma_b(kN/m^3)$	25
$\gamma(kN/m^3)$	20

Procura-se, ao mesmo tempo, conhecer a influência que determinadas características do terreno, *vide* ângulo de resistência ao corte do solo ϕ' e inclinação do terreno suportado i , têm no resultado do impulso activo horizontal e, por tal, é considerada uma gama variável de valores para esses parâmetros, existindo uma panóplia de combinações entre ambos. É apresentada, de seguida, a Tabela 3.2 com os valores considerados para os referidos ângulos e as respectivas combinações dos mesmos.

Tabela 3.2: Valores dos ângulos de resistência ao corte do solo e da inclinação da superfície do terreno analisados.

Ângulo de resistência ao corte do solo (ϕ')	Inclinação da superfície de terreno (i)							
	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°
20°	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-
30°	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-
40°	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
45°	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

O estudo baseia-se nos resultados de $2 \times 3 \times (4 + 6 + 16) = 156$ cálculos, cobrindo um leque razoável de situações distintas.

3.5.1.2 Método C_2

Para o presente método e de acordo com o referido na secção 3.3.3, é desenvolvido um *layout* num programa de cálculo matemático, que visa percorrer um vasto leque de combinações entre dimensões do muro e características do solo. Por conseguinte, apresenta-se, na Figura 3.13, o referido *layout* com o respectivo *input* em que são inseridos os valores que se pretendem para o muro e para o solo, estando, por tal, presente uma combinação exemplificativa.

INPUT	
Parâmetros do Muro	Parâmetros do Solo
B_1 (m) 4	ϕ' (°) 30
a (m) 0	i (°) 10
b_2 (m) 0,5	γ_s (kN/m ³) 20
b_1 (m) 0,5	
H (m) 8	
e (m) 1	
γ_b (kN/m ³) 25	

Figura 3.13: *Layout* do *input*: Método C_2 .

Após a inserção dos dados, são apresentados num outro *layout*, os valores calculados pelo programa, sendo estes os constantes no *output* presente na Figura 3.14.

OUTPUT			
Muro	Relação B_2/H	Solo	
B_2 (m) 3,5	B_2/H 0,438	$\delta_{\text{solo-solo}}$ (°) 30	
ξ (°) 0		$\delta_{\text{solo-est.}}$ (°) 20	
α (°) 90			
φ (°) 0			
β^* (°) 117			
w_1 (kN/m) 87,5	$(I_a^H)_{\max}$ 251,6	β_{C2} (°) 115	
w_2 (kN/m) 100,0	$[I_a^H/(0,5 \cdot \gamma \cdot H^2)]_{\max}$ 0,393	$\beta_{C2, \text{lat}}$ (°) 115	
w_3 (kN/m) 0	$[\tan(\delta)]_{\max}$ 0,334	$\beta_{C2, \tan(\delta)}$ (°) 115	
w_4 (kN/m) 0			

Figura 3.14: *Layout* do *output*: Método C_2 .

Os valores considerados na análise paramétrica são os já indicados na Tabela 3.2. Para a relação e/H adopta-se o valor de 0,125. Os resultados desta análise paramétrica são apresentados na secção 3.5.3.

No entanto, Barghouthi (1990) apresenta, no seu estudo, alguns resultados comparáveis com os do presente estudo se a relação e/H for igual a zero. Tais resultados são obtidos para $\phi' = 30^\circ$, δ_p igual a 0 e $2/3\phi' (= 20^\circ)$ e β_{C2}^* igual a 100° e 110° . São, assim, realizados alguns cálculos adicionais com $e/H = 0$. Tais resultados e a sua comparação com os de Barghouthi (1990) são apresentados na Tabela 3.3, concluindo-se que são obtidos valores muito semelhantes.

Tabela 3.3: Resultados obtidos por Barghouthi (1990) (indicados com o índice B); comparação com os resultados do método C_2 .

Parâmetro analisado	$\beta_{C_2}^* = 10^\circ$				$\beta_{C_2}^* = 20^\circ$			
	$i = 0^\circ$		$i = 10^\circ$		$i = 0^\circ$		$i = 10^\circ$	
	$\delta_p = 0^\circ$	$\delta_p = 20^\circ$	$\delta_p = 0^\circ$	$\delta_p = 20^\circ$	$\delta_p = 0^\circ$	$\delta_p = 20^\circ$	$\delta_p = 0^\circ$	$\delta_p = 20^\circ$
β'_B	120°	112°	117°	110,5°	120°	116°	115,5°	113,5°
β_{C_2, I_a^H}	120°	112°	119°	111°	120°	116°	117°	113°
$(I_a^H / \frac{1}{2} \gamma H^2)_B$	0,333	0,310	0,374	0,358	0,333	0,328	0,391	0,389
$(I_a^H / \frac{1}{2} \gamma H^2)_{C_2}$	0,333	0,311	0,379	0,358	0,333	0,328	0,392	0,389

3.5.2 Condição de deslizamento

3.5.2.1 Métodos R e C_1

Adoptando todas as considerações feitas para os presentes métodos, pretende-se analisar a influência do comprimento da base do muro, transmitida por B_2/H na relação entre as cargas verticais e horizontais presentes no problema e, conseqüentemente, na condição de deslizamento do muro. Assim, todas as dimensões e grandezas necessárias para uma correcta percepção do problema encontram-se ilustradas nas Figuras 3.9 e 3.10, presentes nas secções 3.4.1 e 3.4.2, respectivamente para os métodos R e C_1 . Análogamente ao cálculo do impulso activo horizontal, as combinações entre a resistência ao corte do solo e a inclinação da superfície do terreno suportado são as apresentadas na Tabela 3.2.

As dimensões adoptadas para o muro são as consideradas na Tabela 3.1, presente na secção 3.5.1.1.

Dado que, no presente estudo, as faces exterior e interior da estrutura são consideradas verticais, existe unicamente um dos pesos respeitantes à estrutura que se revela fixo, sendo para as dimensões dispostas na Tabela 3.1, o apresentado na Tabela 3.4. Os restantes pesos presentes no estudo vêm o seu valor variar consoante o comprimento da base do muro.

Tabela 3.4: Pesos presentes no modelo de cálculo.

Peso	Valor
$W_1(kN/m)$	87,5
$W_2(kN/m)$	variável
$W_s(kN/m)$	variável

3.5.2.2 Método C_2

O *layout* presente na secção 3.5.1.2 serve de base também para o presente caso, obtendo-se os resultados visíveis no *output* do mesmo.

Procura-se conhecer a evolução do intervalo angular β_{C_2} (descrito na secção 3.4.3) que maximiza a relação que transmite a condição de deslizamento, dada por $\tan \delta$.

3.5.3 Resultados do impulso activo

3.5.3.1 Apresentação dos resultados

Nas Figuras 3.15 a 3.20 apresenta-se a evolução do impulso activo adimensionalizado em função do comprimento da base do muro, também adimensionalizada, para vários valores da inclinação do terreno e vários valores do ângulo de resistência ao corte do solo. Assim, na Figura 3.15 apresentam-se os resultados para $\phi' = 20^\circ$; na Figura 3.16 apresentam-se os resultados para $\phi' = 30^\circ$; nas Figuras 3.17 e 3.18 para $\phi' = 40^\circ$; nas Figuras 3.19 e 3.20 apresentam-se os resultados para $\phi' = 45^\circ$.

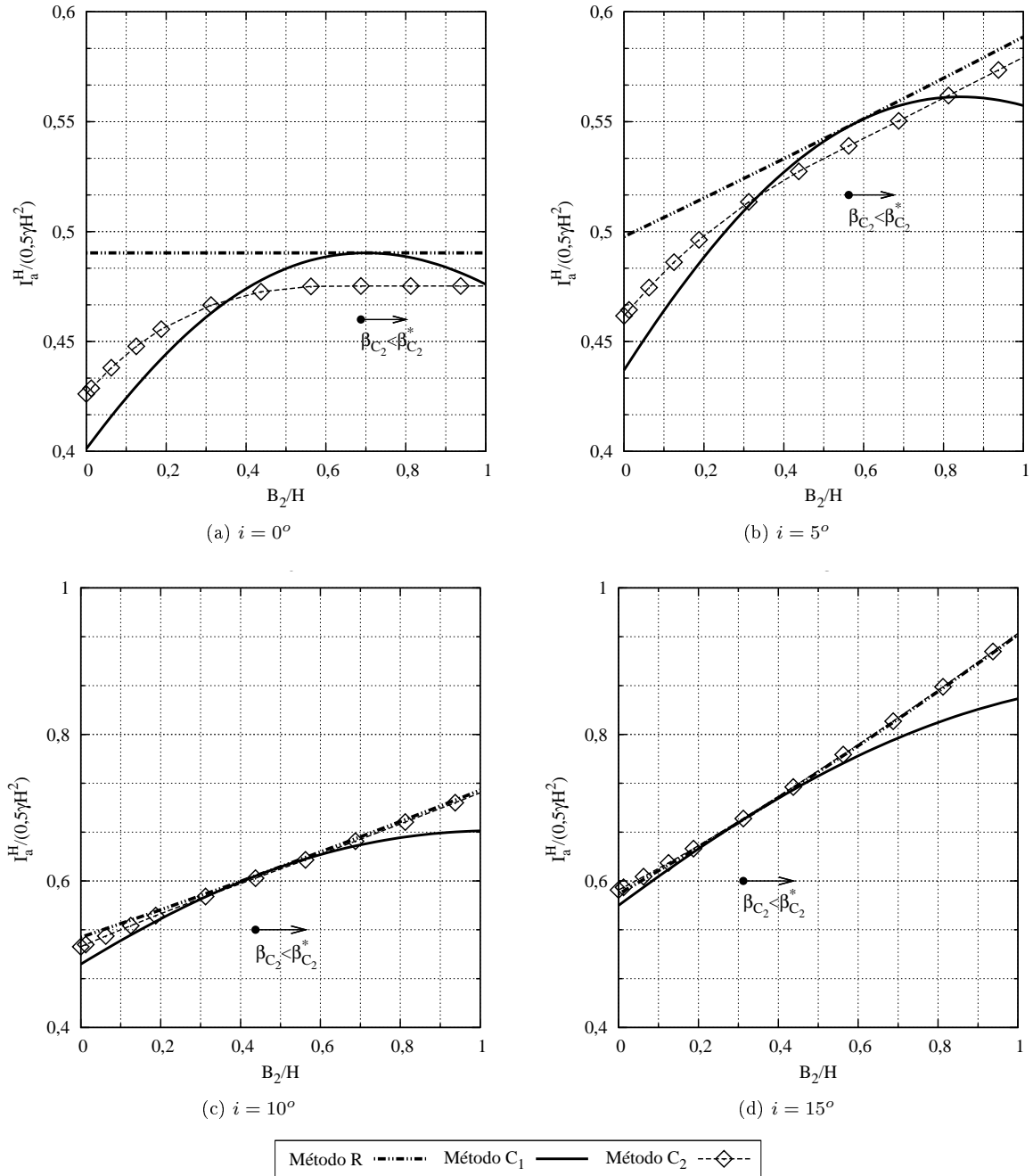


Figura 3.15: Variação do impulso activo adimensionalizado com a largura adimensionalizada do muro para diversas inclinações do terreno: $\phi' = 20^\circ$; $e/H = 0,125$.

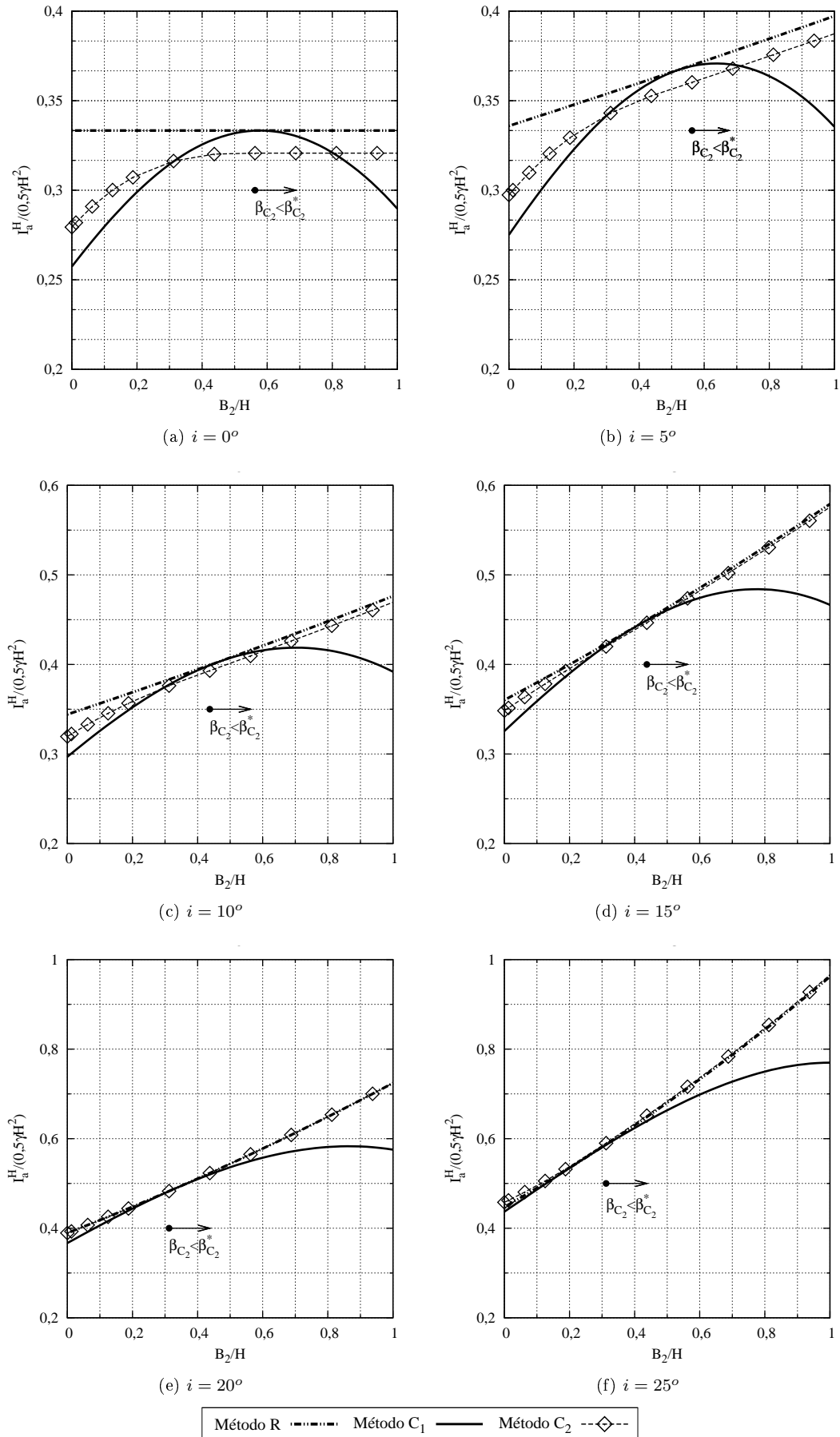


Figura 3.16: Variação do impulso activo adimensionalizado com a largura adimensionalizada do muro para diversas inclinações do terreno: $\phi' = 30^\circ$; $e/H = 0,125$.

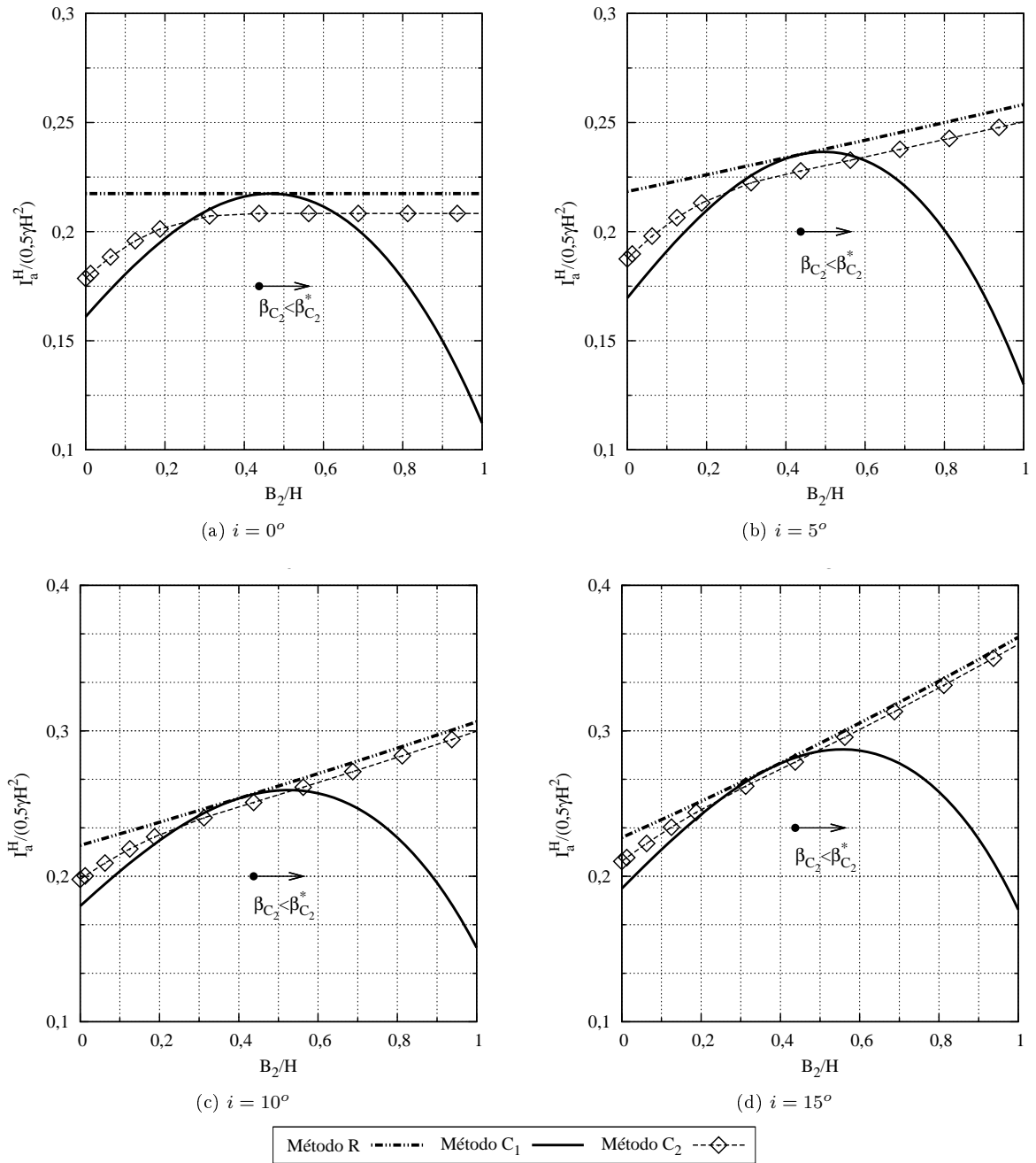


Figura 3.17: Variação do impulso activo adimensionalizado com a largura adimensionalizada do muro para diversas inclinações do terreno: $\phi' = 40^\circ$; $e/H = 0,125$.

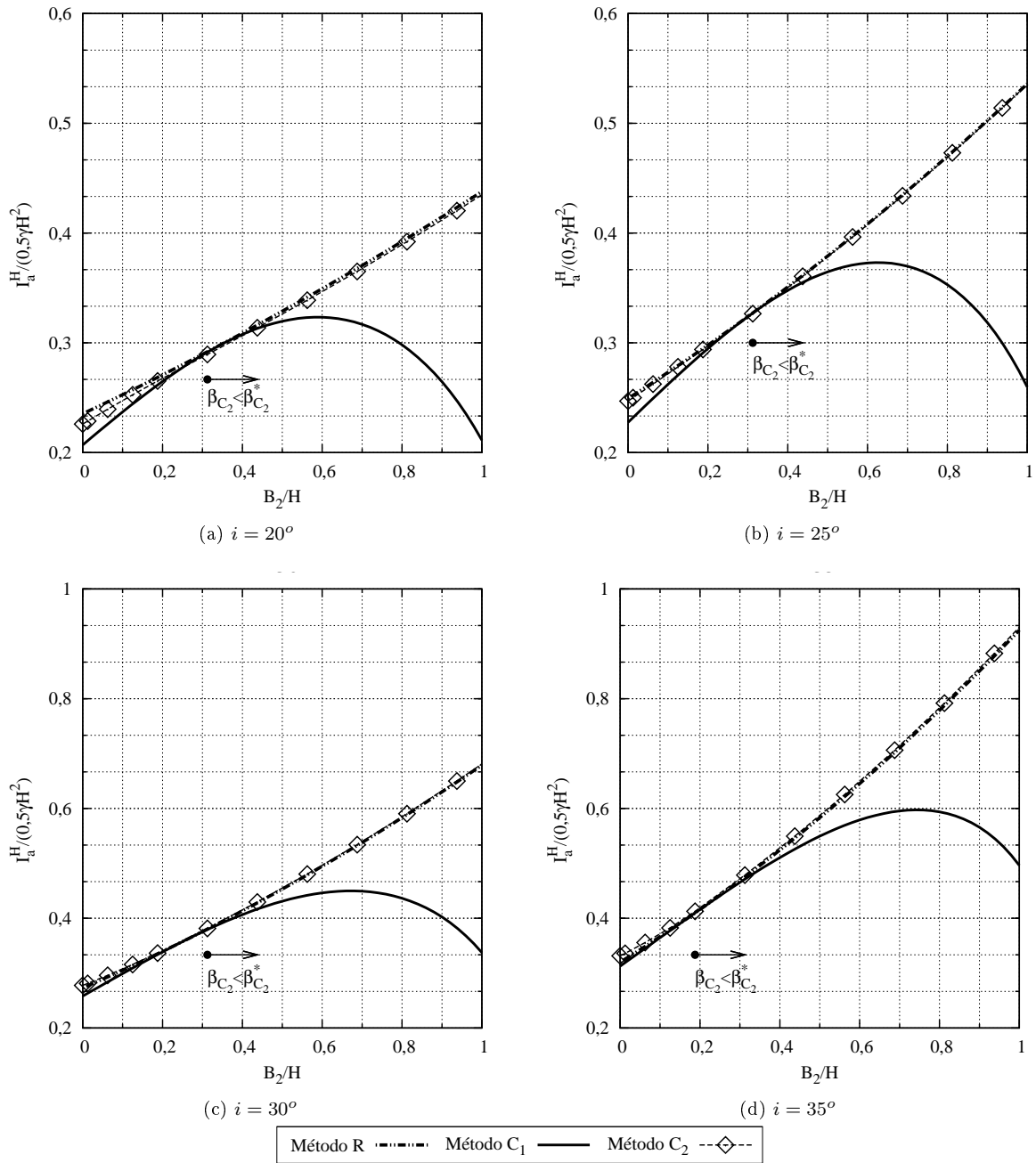


Figura 3.18: Variação do impulso activo adimensionalizado com a largura adimensionalizada do muro para diversas inclinações do terreno: $\phi' = 40^\circ$; $e/H = 0,125$ (continuação).

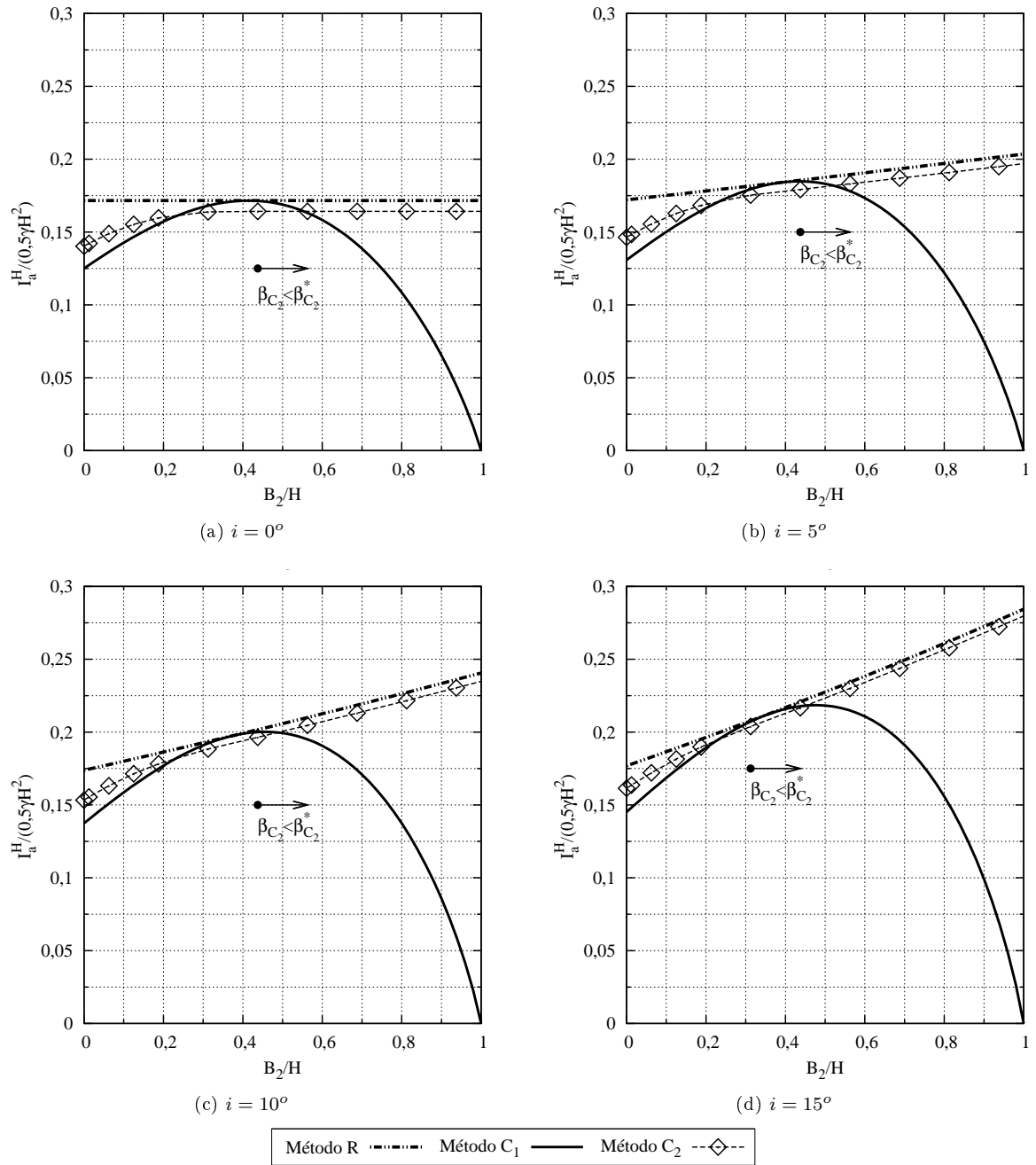


Figura 3.19: Variação do impulso activo adimensionalizado com a largura adimensionalizada do muro para diversas inclinações do terreno: $\phi' = 45^\circ$; $e/H = 0,125$.

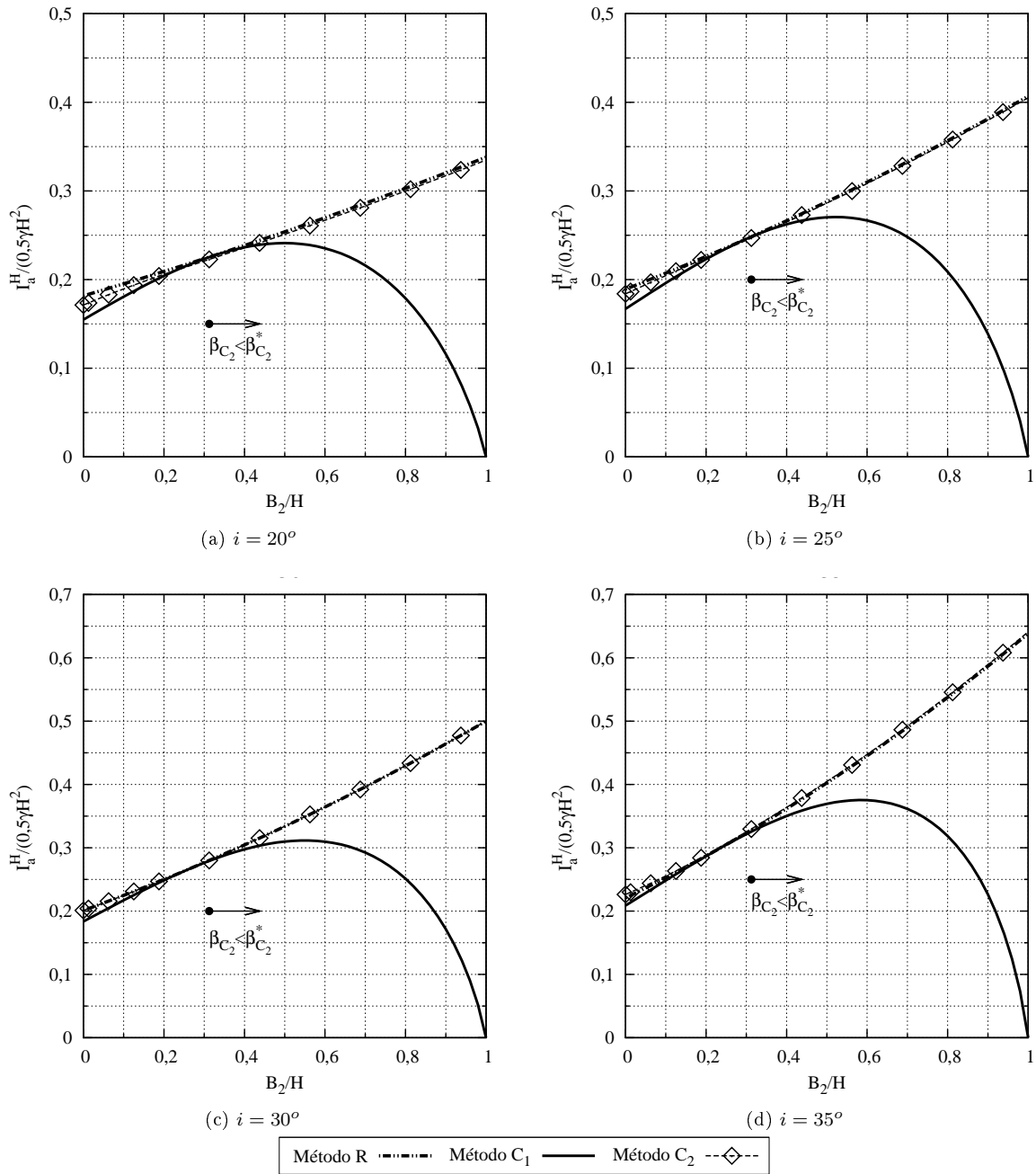


Figura 3.20: Variação do impulso activo adimensionalizado com a largura adimensionalizada do muro para diversas inclinações do terreno e $\phi' = 45^\circ$; $e/H = 0,125$ (continuação).

3.5.3.2 Análise dos resultados

Da análise dos resultados obtidos e representados nas Figuras 3.15 a 3.20 é possível concluir que:

- o método R conduz a valores da relação $I_a^H / \frac{1}{2} \gamma H^2$ superiores aos restantes métodos sempre que $i < \delta$; são iguais aos do método C_2 quando $i = \delta$ e são ligeiramente inferiores quando $i > \delta$;
- para os casos em que $i \geq \phi'/2$, o método C_2 apresenta valores semelhantes aos do método R ; para $i < \phi'/2$ as diferenças são maiores;
- existe uma gama de valores da relação B_2/H para os quais os resultados do método R e C_1 são praticamente iguais;
- até determinados valores de B_2/H , há uma relativa semelhança entre os resultados do método C_1 e C_2 ;
- o método C_1 afasta-se dos restantes, sobretudo, para relações B_2/H elevadas.

Para uma análise mais detalhada, resumem-se, na Figura 3.21, todos os resultados obtidos do método C_2 , representados nas Figuras 3.15 a 3.20. A análise da Figura 3.21 mostra que o impulso activo adimensionalizado aumenta continuamente com B_2/H , com excepção do caso em que $i = 0^\circ$, onde é atingido um patamar, tal como referido por Barghouthi (1990). Na Figura 3.21b sobrepõem-se, para $\phi' = 30^\circ$, a título exemplificativo, os resultados obtidos pelo método R para os casos $i = 0^\circ$, $i = 2/3\phi'$ e $i = 25^\circ$. Verifica-se, da análise desta Figura que: para $i = 0^\circ$, a partir de dado valor de B_2/H , os impulsos obtidos do método C_2 correspondem, aproximadamente, ao impulso de Rankine; os impulsos obtidos do método C_2 são exactamente os impulsos de Rankine para o caso $i = \delta$; os impulsos obtidos do método C_2 são inferiores aos de Rankine para $i < \delta$ e superiores (ligeiramente) para $i > \delta$.

A razão para os impulsos serem diferentes dos de Rankine, para $\beta_{C2} < \beta_{C2}^*$, nos casos $i < \delta$ e $i > \delta$, prende-se com a altura e da sapata. Com efeito, no presente estudo tal altura é considerada, ao passo que Barghouthi (1990) despreza-a. Assumindo-se $\delta = 2/3\phi'$, é apenas para o caso $i = \delta$ que as duas soluções coincidem. O assunto será alvo de análise específica na secção 3.7.

A Figura 3.22, análoga à 3.21, apresenta em ordenadas o valor de β_{C2, I_a^H} em vez do impulso adimensionalizado. Este ângulo resulta da maximização da componente horizontal do impulso activo. Aos resultados são sobrepostos os obtidos através da expressão 2.14 (Barghouthi, 1990), para o caso em que o paramento se encontra acima do topo do muro, isto é, $\beta_{C2} < \beta_{C2}^*$.

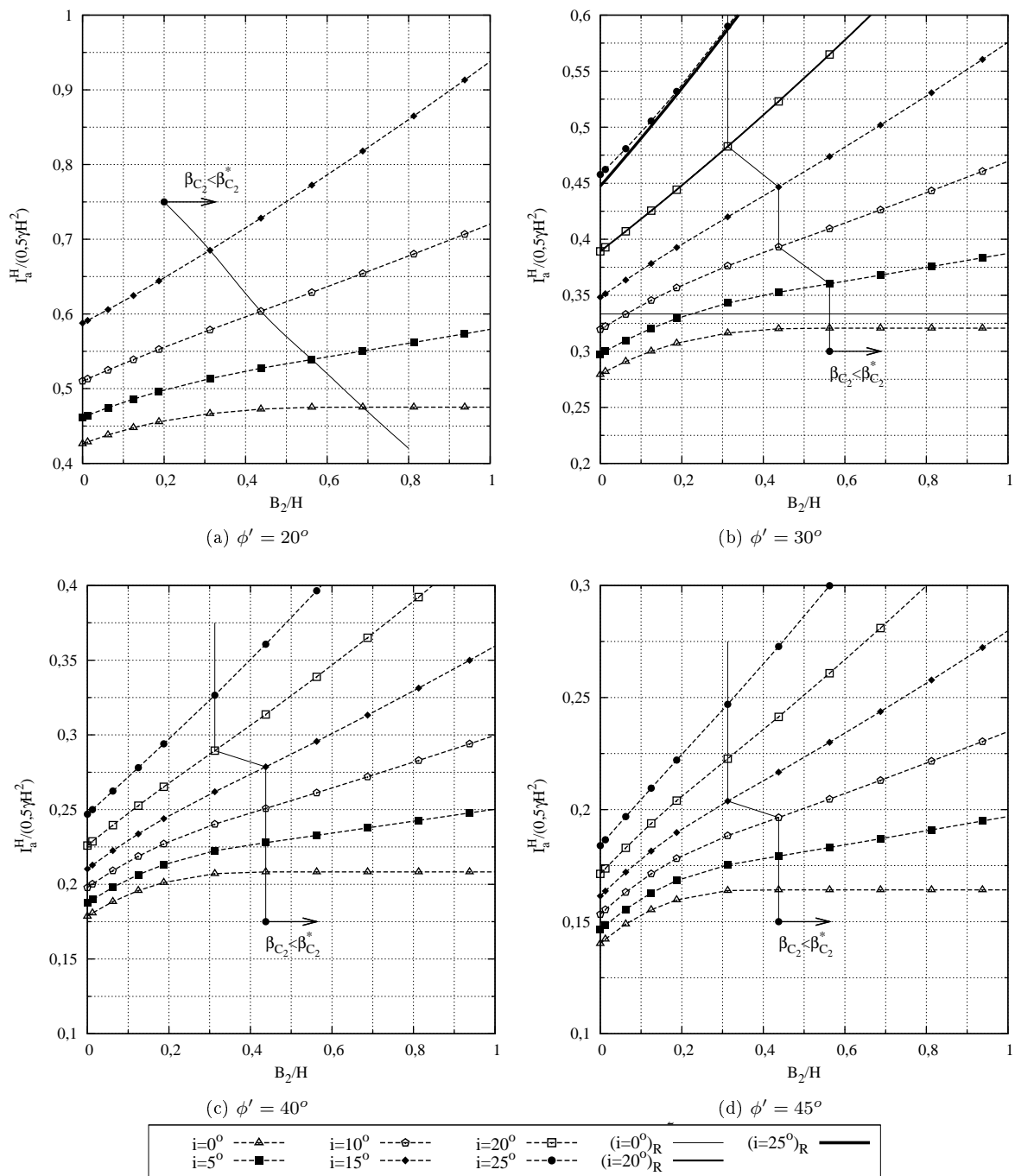


Figura 3.21: Variação do impulso activo adimensionalizado com a largura adimensionalizada do muro para diversos ângulos de resistência ao corte e inclinações do terreno: resultados obtidos pelo método C_2 : $e/H = 0,125$.

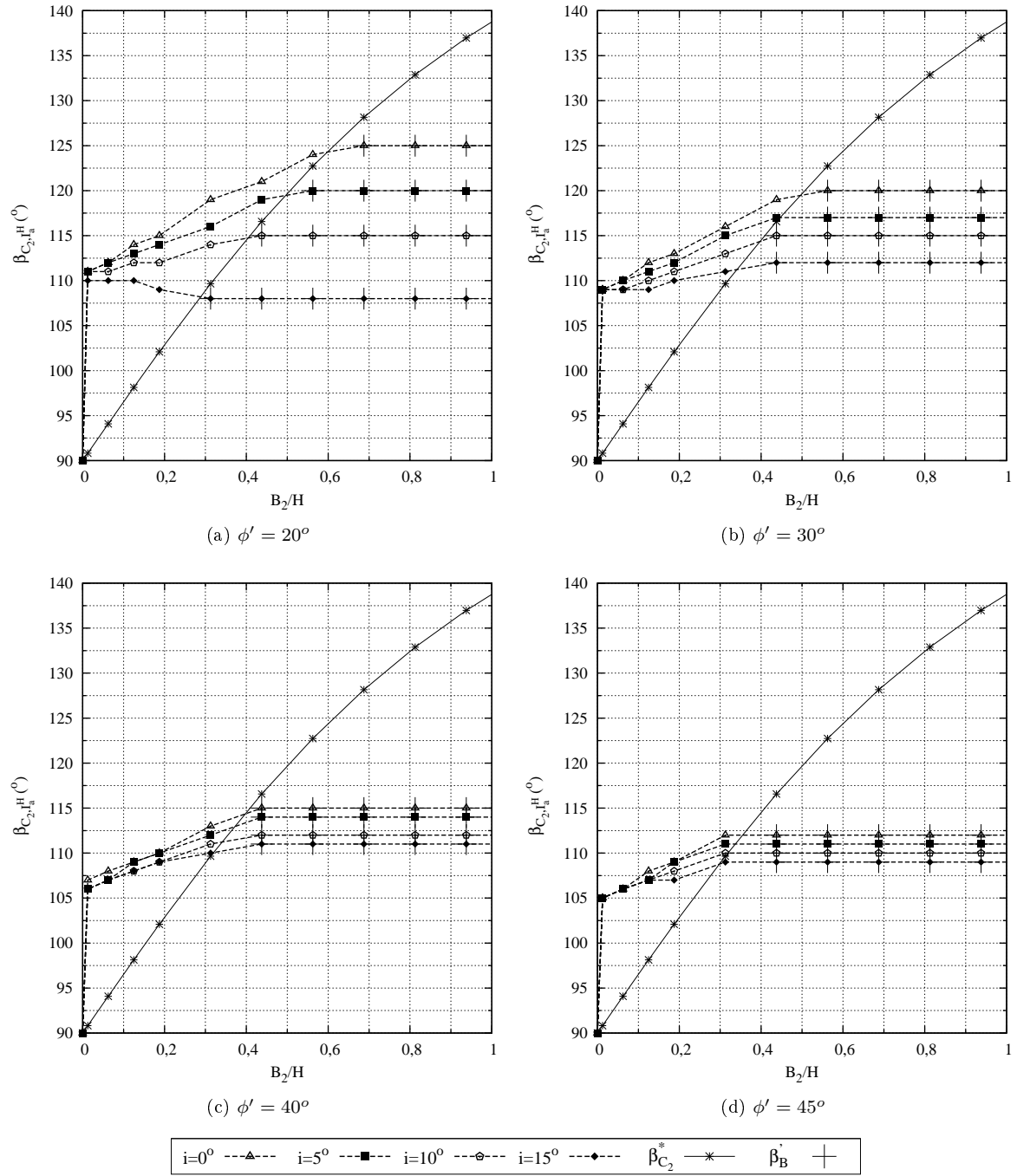


Figura 3.22: Variação da inclinação β_{C_2, I_a^H} com a largura adimensionalizada do muro para diversas inclinações do terreno e ângulos de resistência ao corte do solo : método C_2 : $e/H = 0,125$.

Verifica-se da análise desta figura que, a partir de certo valor de B_2/H (variável com ϕ'), o ângulo β_{C2,I_a^H} estabiliza, mantendo-se constante, independentemente do aumento da base do muro. Os valores de β_{C2,I_a^H} , após a sua estabilização, mostram-se semelhantes aos obtidos por Barghouthi (1990). Para ilustrar o comportamento descrito, apresenta-se a Figura 3.23, na qual se representam os ângulos β_{C2,I_a^H} para o caso $\phi' = 20^\circ$ e $i = 5^\circ$, para três valores baixos da relação B_2/H (0,188, 0,313 e 0,438) e para três valores elevados da mesma relação (0,688, 0,813 e 0,938).

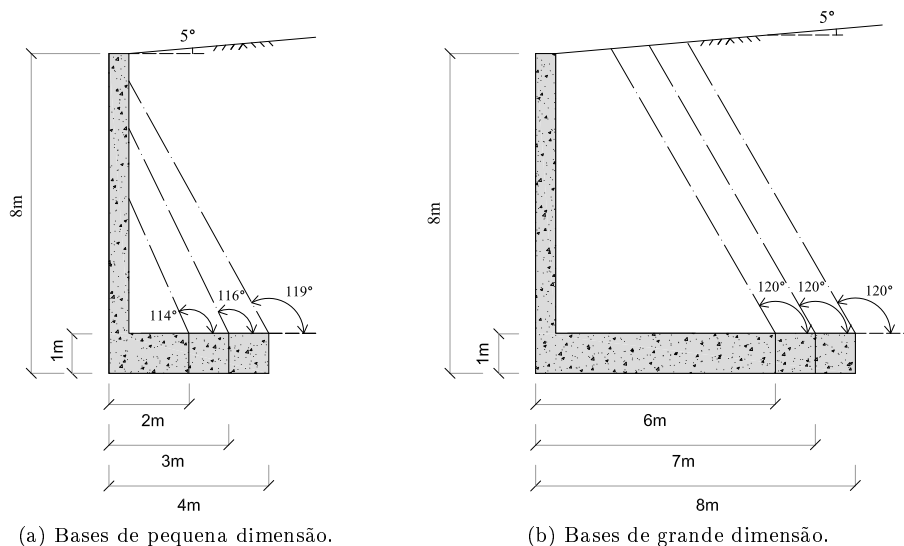


Figura 3.23: Representação da inclinação β_{C2,I_a^H} para $\phi' = 20^\circ$, $e/H = 0,125$ e $i = 5^\circ$: método C_2 .

Conforme se mostra na figura, verifica-se, de facto, que para bases de pequena dimensão existe um aumento de β_{C2,I_a^H} (com a dimensão da base) e que para bases de grande dimensão o mesmo não se verifica. É interessante fazer-se notar que, apesar de, neste último caso, não haver evolução de β_{C2,I_a^H} , existir um aumento de I_a^H , para $i \neq 0^\circ$ (Figura 3.21). Tal deve-se ao aumento da altura virtual do muro de suporte.

3.5.4 Resultados da condição de deslizamento

3.5.4.1 Apresentação dos resultados

Nas Figuras 3.24 a 3.29 apresenta-se a evolução da condição de deslizamento do muro (expressão 3.36), em função do comprimento da base do muro (também adimensionalizada) para vários valores de inclinação do terreno e vários valores do ângulo de resistência ao corte do solo. Assim, na Figura 3.24 apresentam-se os resultados para $\phi' = 20^\circ$, apresentando-se, na Figura 3.25, os resultados para $\phi' = 30^\circ$. Nas Figuras 3.26 e 3.27 apresentam-se os resultados para $\phi' = 40^\circ$ e nas Figuras 3.28 e 3.29 os resultados para $\phi' = 45^\circ$.

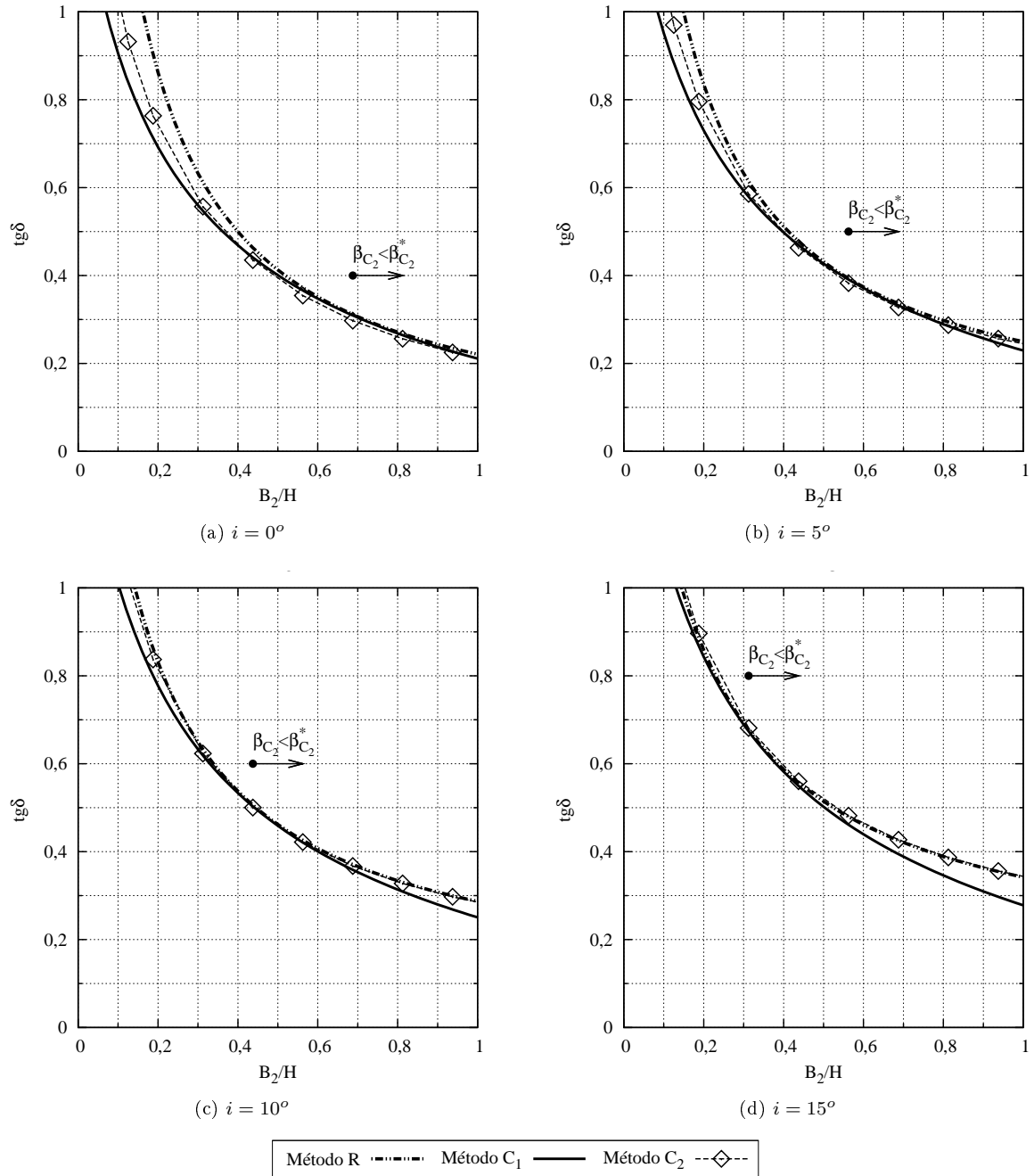


Figura 3.24: Variação da condição de deslizamento com a largura adimensionalizada do muro para diversas inclinações do terreno: $\phi' = 20^\circ$; $e/H = 0,125$.

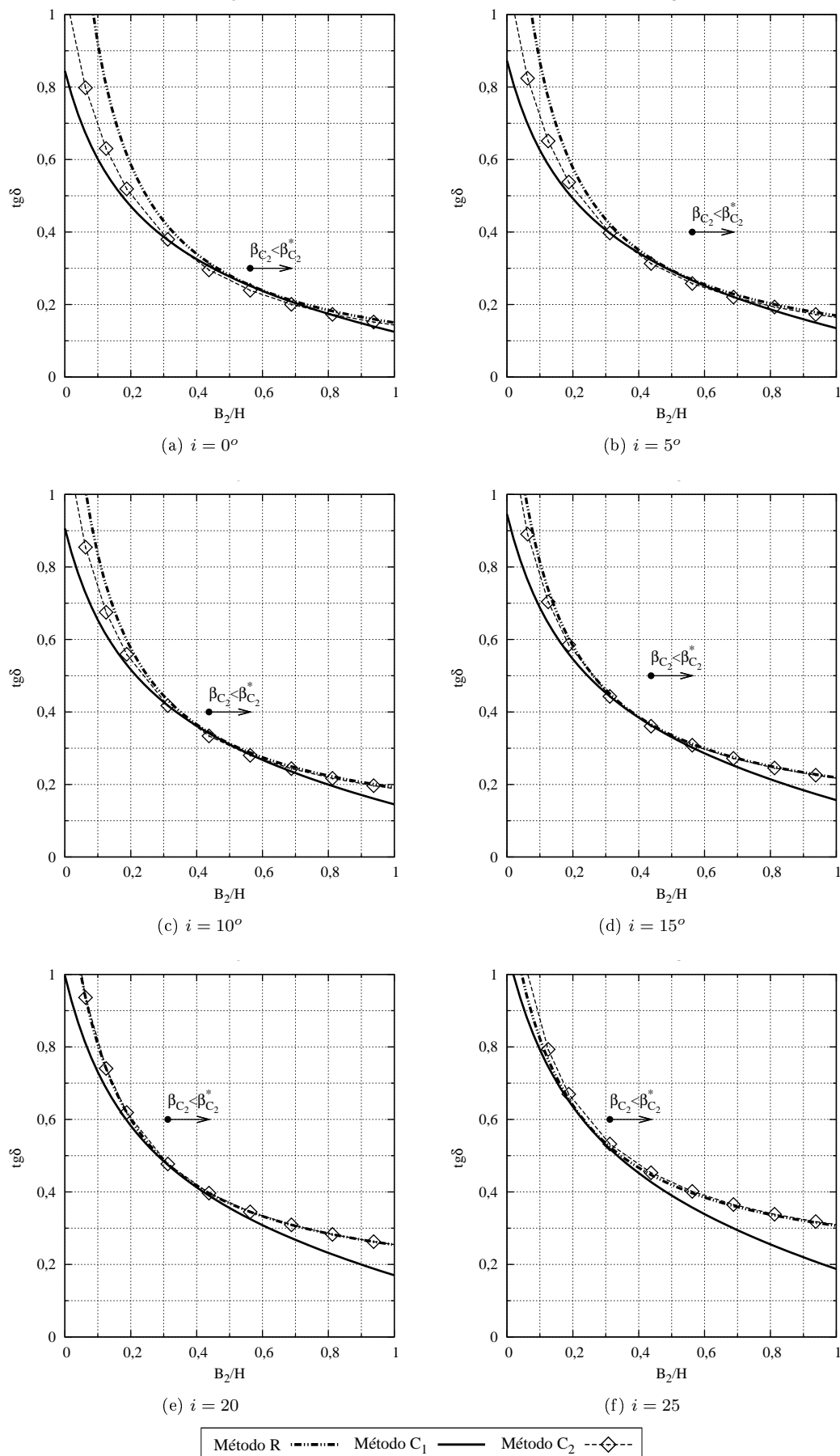


Figura 3.25: Variação da condição de deslizamento com a largura adimensionalizada do muro para diversas inclinações do terreno: $\phi' = 30^\circ$; $e/H = 0,125$.

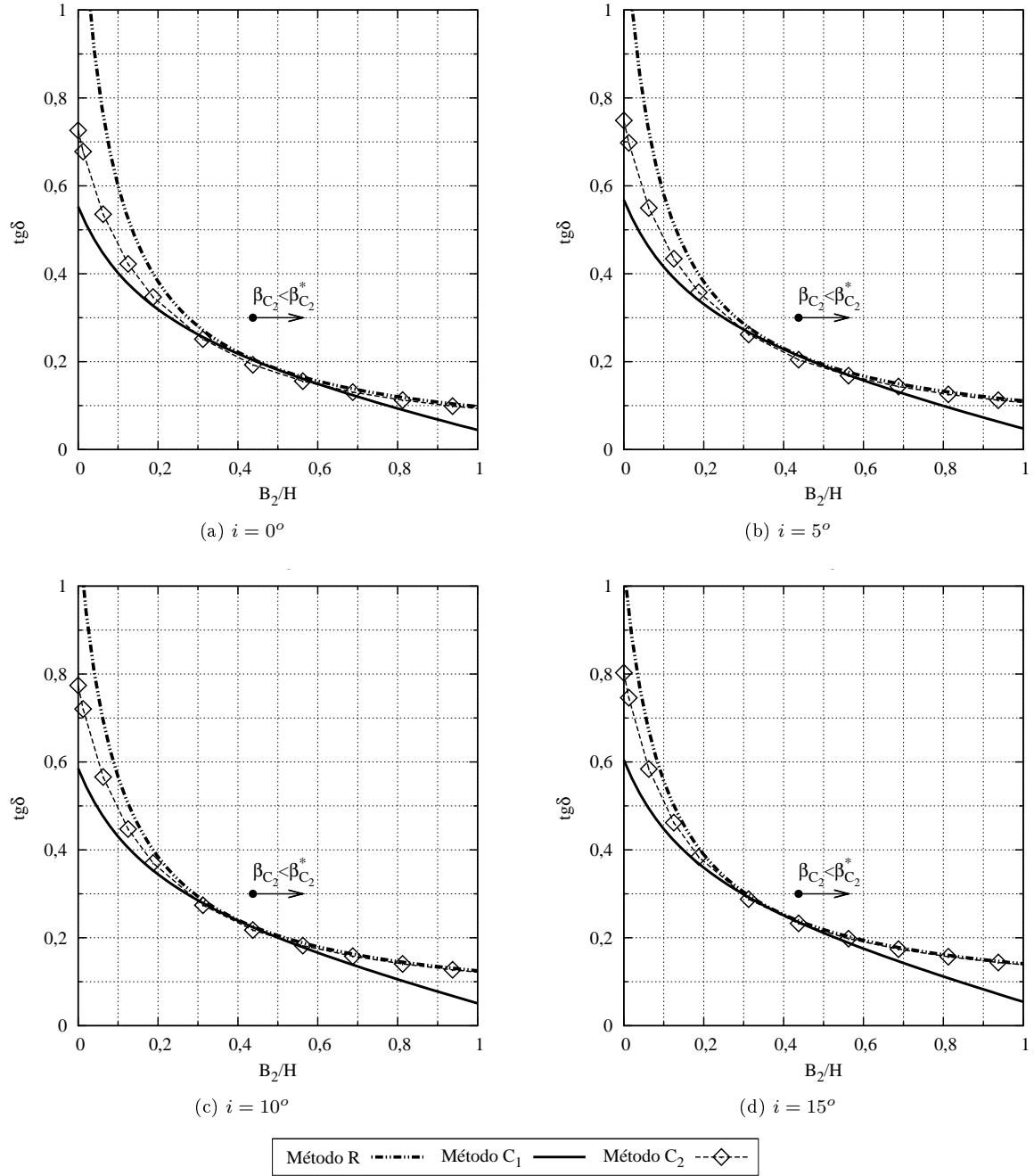


Figura 3.26: Variação da condição de deslizamento com a largura adimensionalizada do muro para diversas inclinações do terreno: $\phi' = 40^\circ$; $e/H = 0,125$.

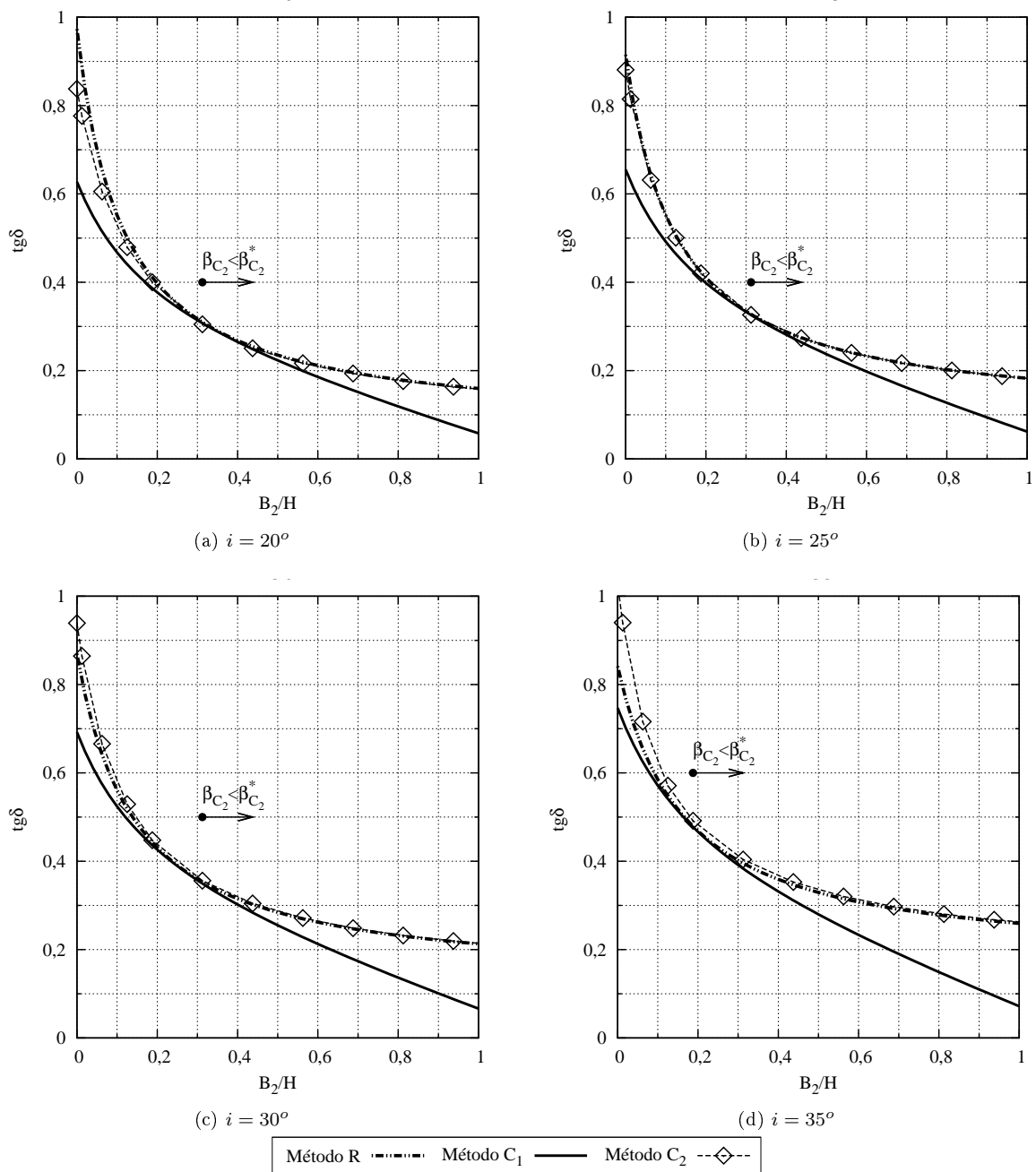


Figura 3.27: Variação da condição de deslizamento com a largura adimensionalizada do muro para diversas inclinações do terreno: $\phi' = 40^\circ$; $\epsilon/H = 0,125$ (continuação).

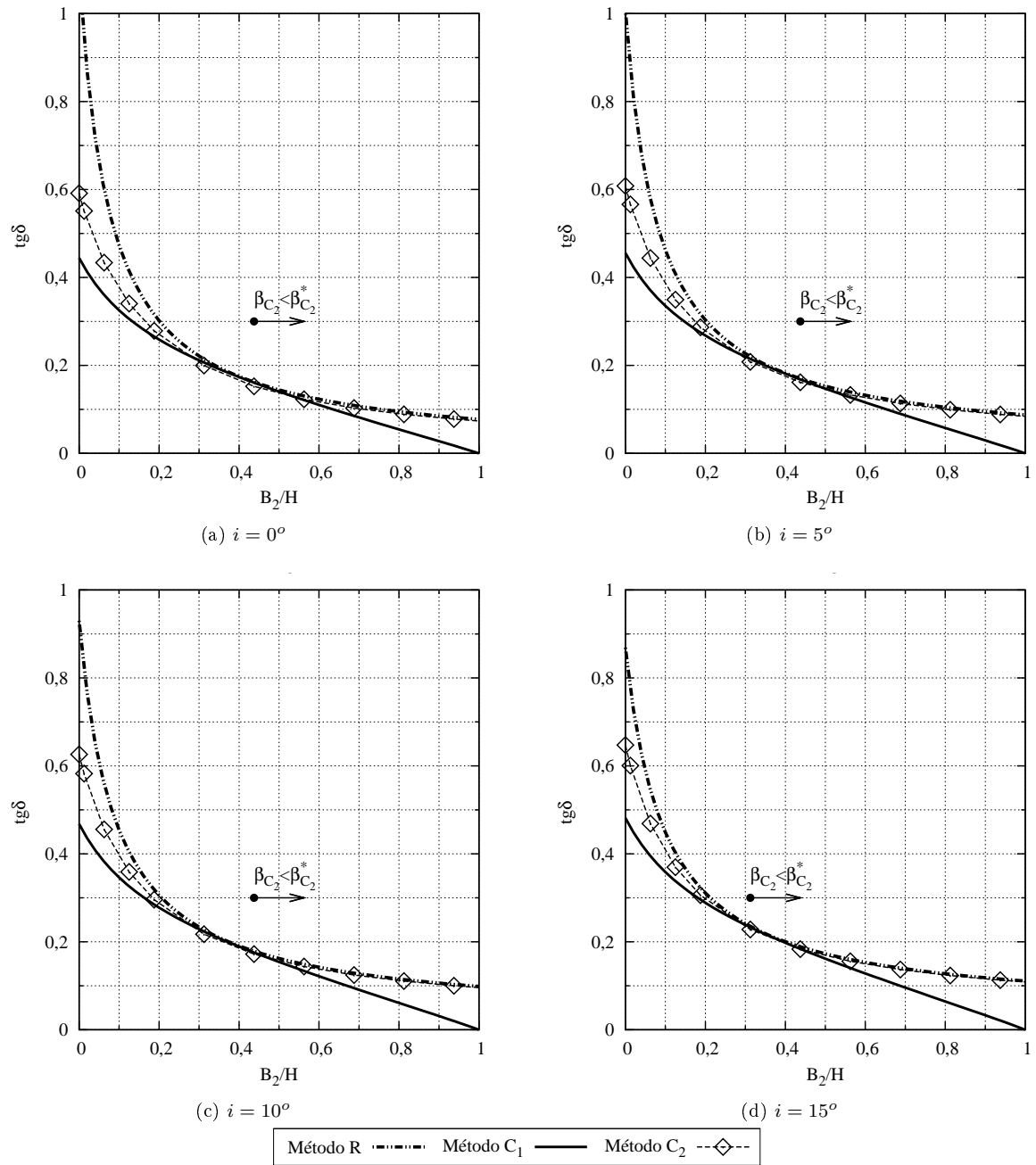


Figura 3.28: Variação da condição de deslizamento com a largura adimensionalizada do muro para diversas inclinações do terreno: $\phi' = 45^\circ$; $e/H = 0,125$.

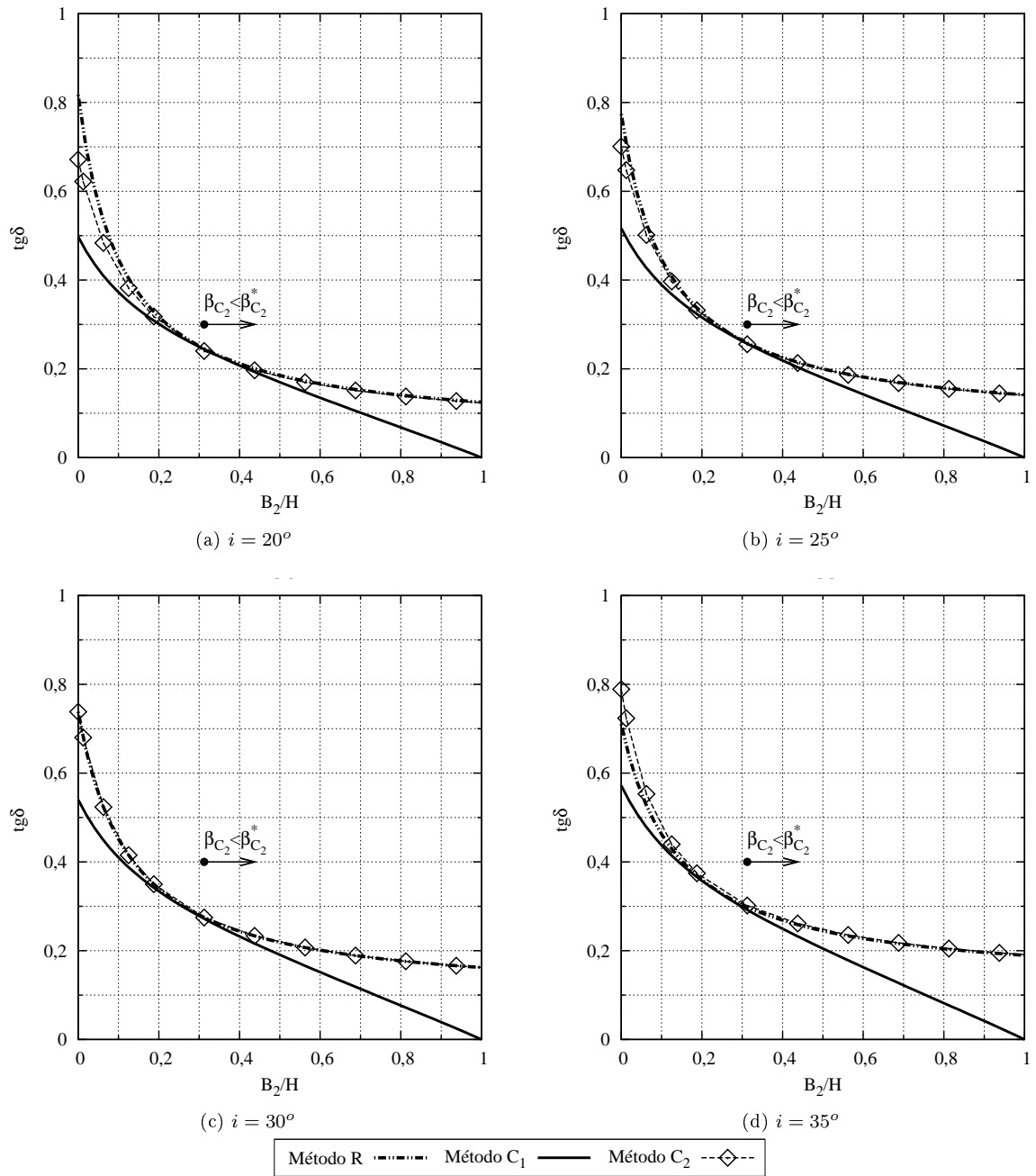


Figura 3.29: Variação da condição de deslizamento com a largura adimensionalizada do muro para diversas inclinações do terreno: $\phi' = 45^\circ$; $\epsilon/H = 0,125$ (continuação).

3.5.4.2 Análise dos resultados

Analisando os resultados é possível concluir que:

- os resultados de $\tan \delta$ obtidos do método R são, normalmente, superiores aos restantes;
- a exceção ocorre para $i > \delta$ (considerado, nos cálculos apresentados, igual a $2/3\phi'$), em especial, para os casos de B_2/H pequenos; para estes casos, o método C_2 fornece valores superiores;
- globalmente, os resultados dos métodos R e C_2 são semelhantes; são exactamente iguais quando $i = \delta$ ($= 2/3\phi'$, o valor adoptado);
- para ângulos de resistência ao corte $\phi' = 20^\circ$ e $\phi' = 30^\circ$, os resultados de $\tan \delta$ são muito semelhantes para os três métodos. Para relações B_2/H elevadas e para valores de i elevados os resultados do método C_1 afastam-se um pouco dos restantes;
- para $\phi' = 40^\circ$ e $\phi' = 45^\circ$ os resultados são semelhantes entre os três métodos para relações B_2/H intermédias.

Resumem-se, na Figura 3.30, todos os resultados obtidos do método C_2 , para uma análise mais detalhada. Desta figura é possível constatar que o valor de $\tan \delta$ não é muito sensível à inclinação do terreno, em especial para $\phi' \geq 30^\circ$.

Procede-se, de forma análoga à realizada a propósito da análise do impulso activo horizontal, ao traçado da curva que relaciona $\beta_{C2, \tan \delta}$ (que resulta da maximização da condição de deslizamento) com B_2/H . Tal é apresentado na Figura 3.31. Aos resultados são sobrepostos os obtidos através da expressão 2.14 (Barghouthi, 1990), para o caso $\beta_{C2} < \beta_{C2}^*$.

Verifica-se, da Figura 3.31, que, tal como se verificou para o caso de β_{C2, I_a^H} , também $\beta_{C2, \tan \delta}$ estabiliza a partir de dado valor de B_2/H , sendo os resultados, neste caso, coincidentes com os apresentados na Figura 3.23. Do mesmo modo que para β_{C2, I_a^H} , os valores estabilizados de $\beta_{C2, \tan \delta}$ mostram-se coincidentes com os obtidos a partir da expressão apresentada por Barghouthi (1990).

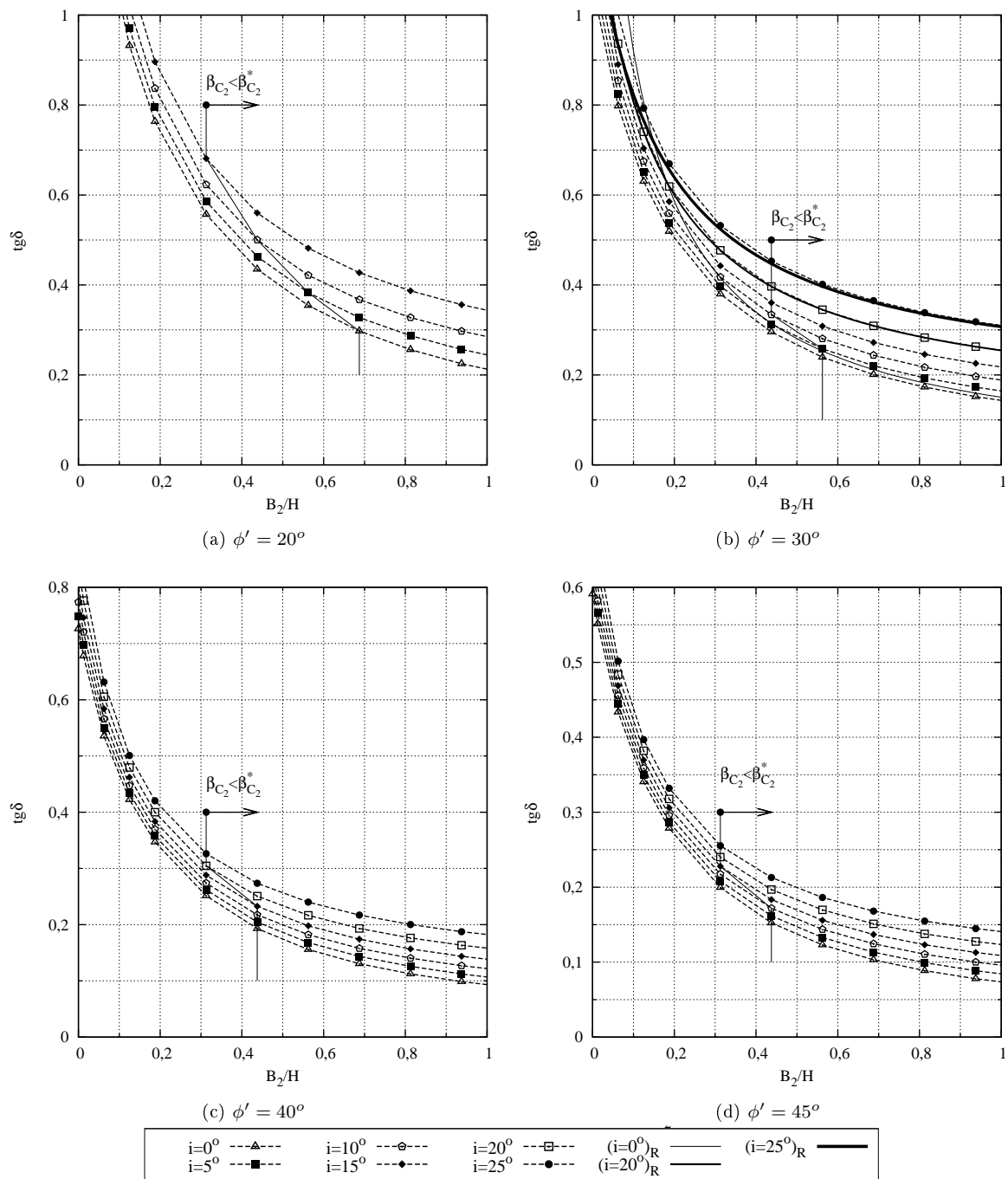


Figura 3.30: Variação da condição de deslizamento com a largura adimensionalizada do muro para diversos ângulos de resistência ao corte e inclinações do terreno: resultados obtidos pelo método C_2 .

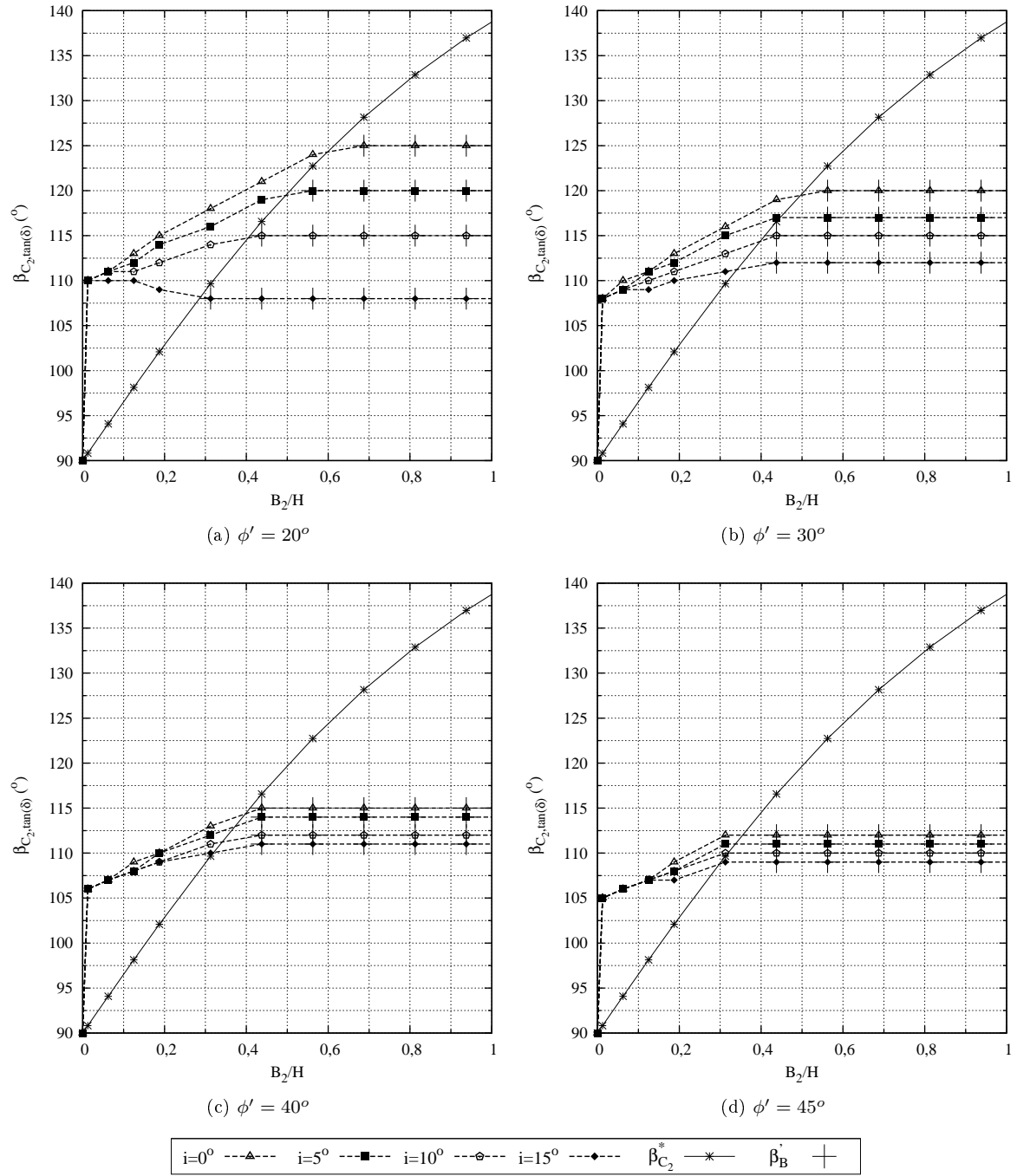


Figura 3.31: Variação da inclinação $\beta_{C_2, \tan \delta}$ com a largura adimensionalizada do muro para diversas inclinações do terreno e ângulos de resistência ao corte do solo : método C_2 .

3.6 Análise paramétrica: influência de δ

3.6.1 Análises realizadas

Para o estudo da influência do ângulo de atrito do contacto solo-estrutura é considerado um solo com uma resistência ao corte de 30° . Faz, apenas, sentido realizar este estudo sobre o método C_2 , dado que no método R o impulso não depende de δ e no método C_1 o impulso é admitido aplicado sobre a cunha morta do solo, ou seja, com $\delta = \phi'$.

Para as mesmas condições do solo e da estrutura são consideradas diferentes inclinações da superfície do terreno, para se analisar também a evolução do impulso activo (adimensionalizado pela razão $I_a^H / \frac{1}{2}\gamma H^2$) e da condição de deslizamento (dada por $\tan \delta$) com o aumento daquela inclinação. São analisados dois casos: um em que o paramento virtual se encontra abaixo do topo do muro, ou seja, $\beta_{C2} > \beta_{C2}^*$, e outro em que aquele paramento se encontra acima do topo do muro e neste caso $\beta_{C2} < \beta_{C2}^*$. Assim, os dois casos descritos são apresentados pela consideração de duas larguras do muro distintas. Para o primeiro caso ($\beta_{C2} > \beta_{C2}^*$) o muro tem uma base de $2m$ de comprimento e para o segundo caso ($\beta_{C2} < \beta_{C2}^*$) aquela tem um comprimento de $7m$.

3.6.2 Resultados

Os resultados obtidos no que diz respeito ao impulso activo (adimensionalizado pela razão $I_a^H / \frac{1}{2}\gamma H^2$), para o tipo de solo considerado, são apresentados nas Figuras 3.32 e 3.33, em função da relação entre o ângulo de atrito solo-estrutura δ_{s-e} e o ângulo de resistência ao corte do solo ϕ' , respectivamente, para o caso $\beta_{C2} > \beta_{C2}^*$ e $\beta_{C2} < \beta_{C2}^*$.

Nas Figuras 3.34 e 3.35 encontram-se os resultados da evolução da condição de deslizamento da estrutura em função do parâmetro analisado, para os casos $\beta_{C2} > \beta_{C2}^*$ e $\beta_{C2} < \beta_{C2}^*$, respectivamente. Em ambas as Figuras apresentam-se, sobrepostos, os resultados obtidos pelos métodos R (em que $\delta_{s-e} = i$) e C_1 (em que $\delta_{s-e} = \phi'$).

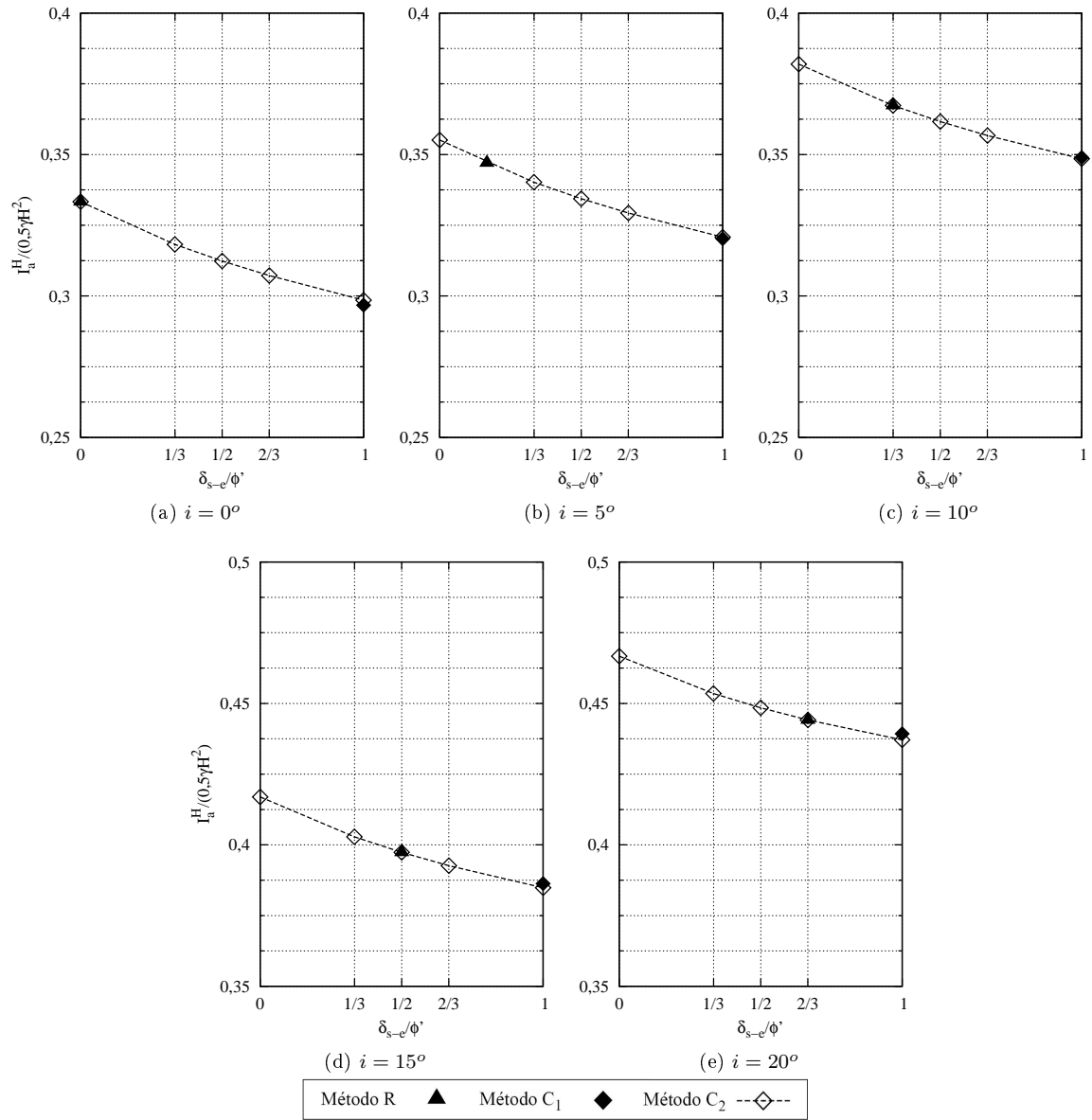


Figura 3.32: Influência do parâmetro δ_{s-e} no impulso activo horizontal para $B_1 = 2m$ ($\frac{B_2}{H} = 0,188$); $\phi' = 30^\circ$. Caso $\beta_{C2} > \beta_{C2}^*$.

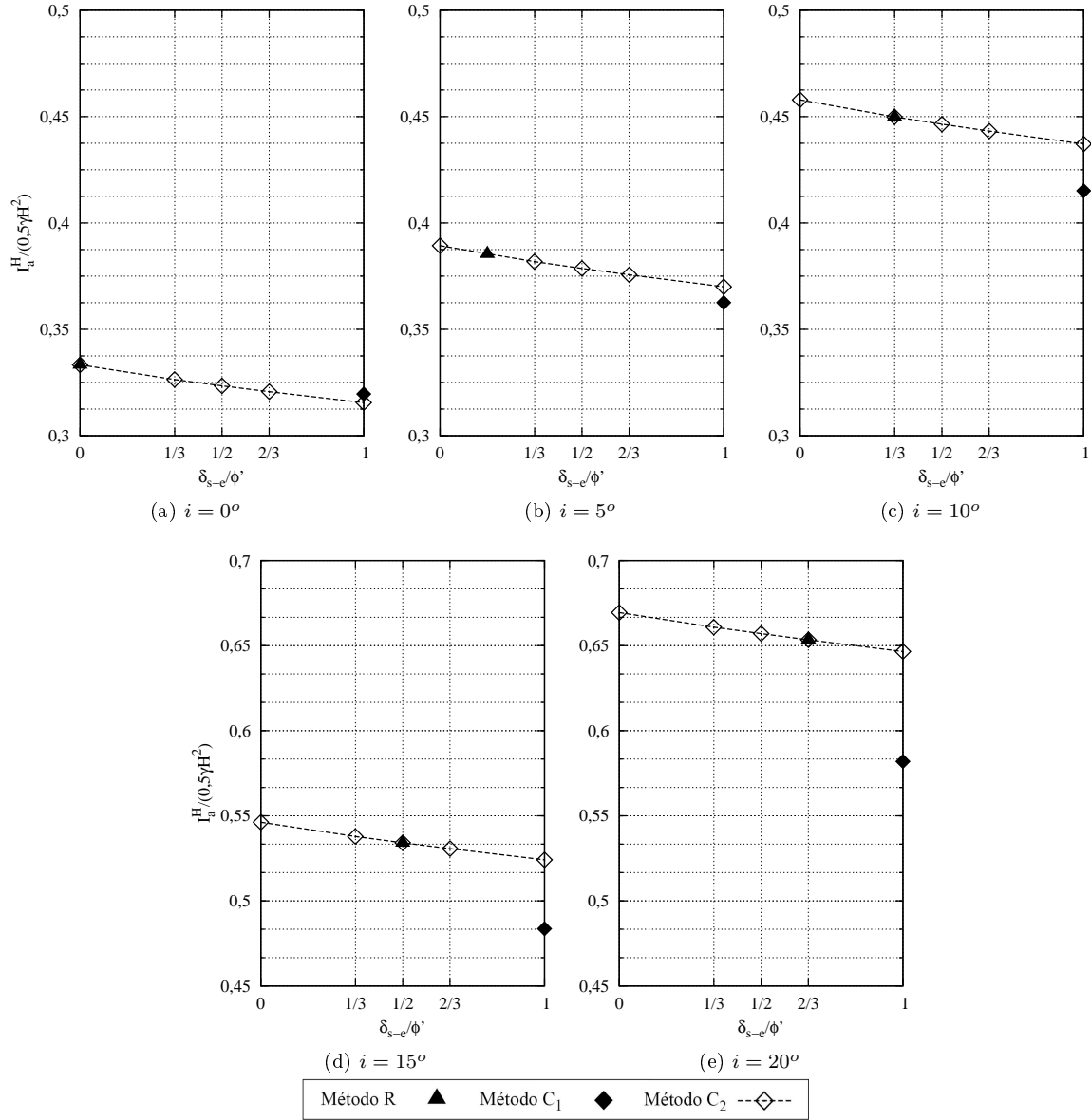


Figura 3.33: Influência do parâmetro δ_{s-e} no impulso activo horizontal para $B_1 = 7\text{ m}$ ($\frac{B_2}{H} = 0,813$); $\phi' = 30^\circ$. Caso $\beta_{C2} < \beta_{C2}^*$.

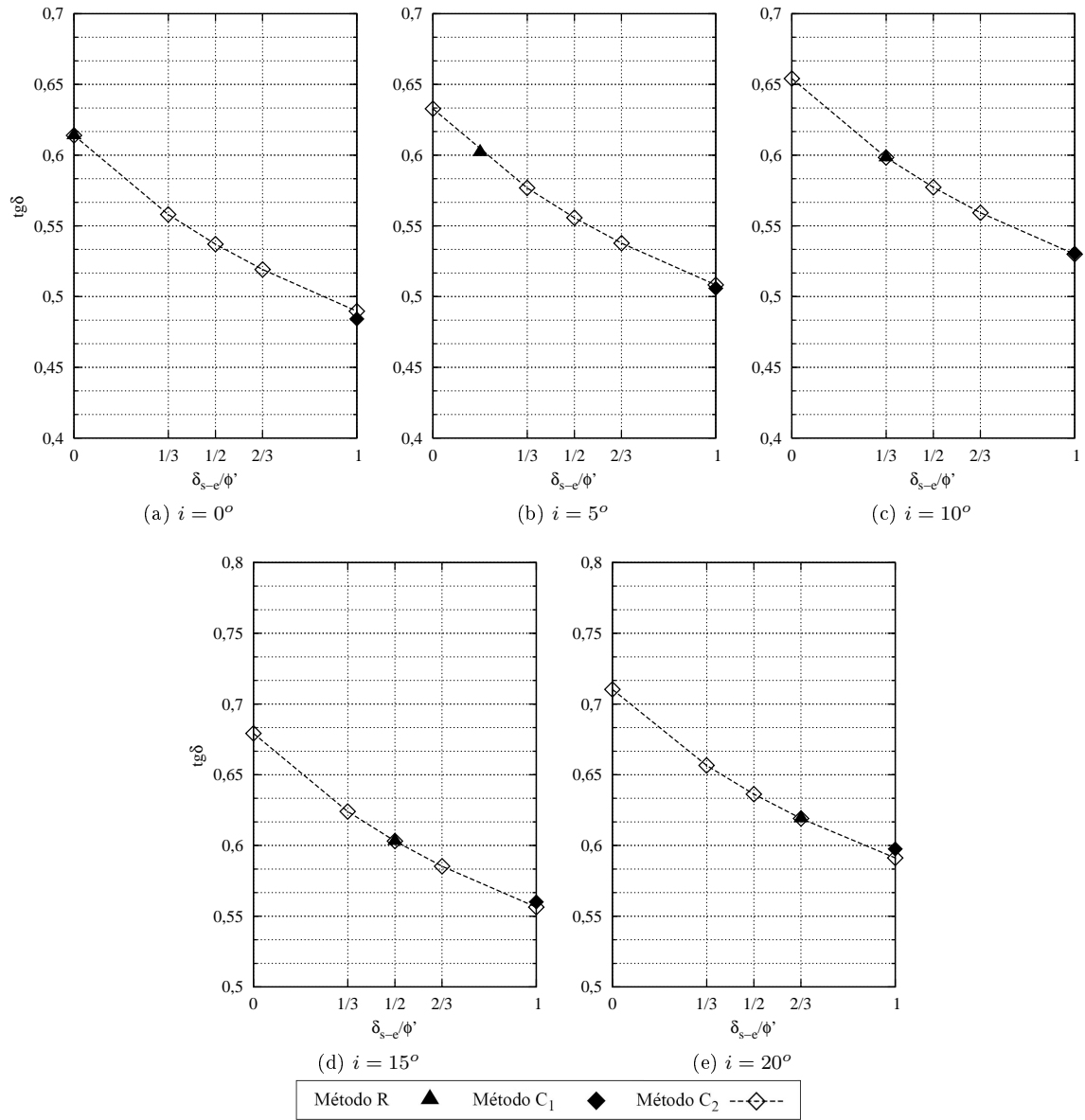


Figura 3.34: Influência do parâmetro δ_{s-e} na condição de deslizamento do muro para $B_1 = 2m$ ($\frac{B_2}{H} = 0,188$); $\phi' = 30^\circ$. Caso $\beta_{C2} > \beta_{C2}^*$.

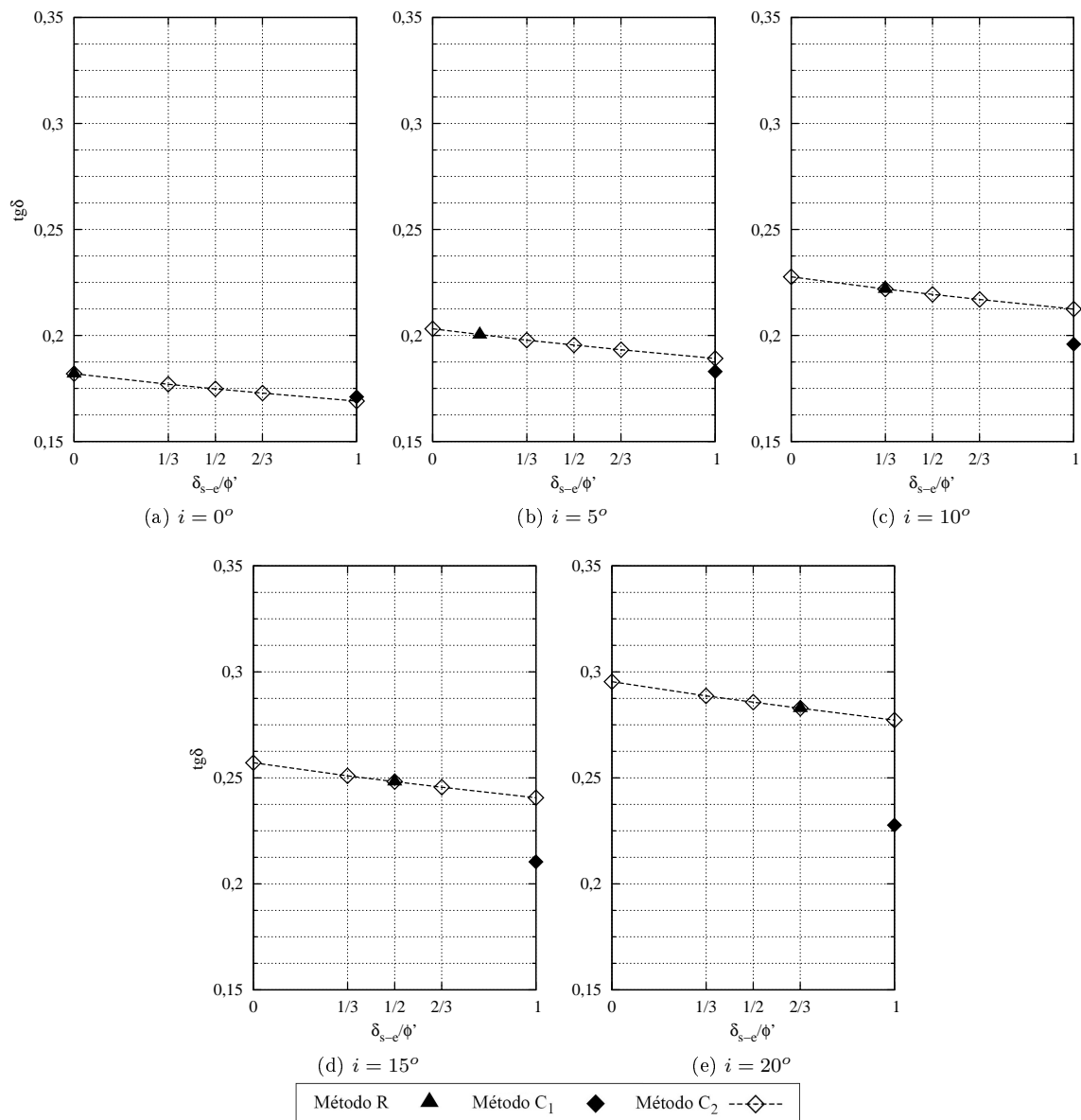


Figura 3.35: Influência do parâmetro δ_{s-e} na condição de deslizamento do muro para $B_1 = 7m$ ($\frac{B_2}{H} = 0,813$); $\phi' = 30^\circ$. Caso $\beta_{C2} < \beta_{C2}^*$.

3.6.3 Análise dos resultados

Analisando os resultados obtidos pelo método C_2 pode afirmar-se que o aumento de δ_{s-e} (igual a δ_p) implica a diminuição de I_a^H e de $\tan \delta$.

Para o caso da relação $B_2/H = 0,188$ pode-se concluir que:

- para valores de $\delta_p = \phi'$, os resultados do método C_2 mostram-se muito semelhantes aos do método C_1 no que diz respeito ao impulso activo horizontal e à condição de deslizamento;
- para valores de $\delta_p = i$, os resultados do método C_2 são coincidentes aos obtidos através do método R . Este facto é válido para o impulso activo horizontal e para a condição de deslizamento.

Para a relação $B_2/H = 0,813$ pode-se concluir que:

- os valores do impulso activo horizontal e da condição de deslizamento obtidos pelos métodos C_1 e C_2 afastam-se com o aumento da inclinação da superfície do terreno;
- da mesma forma que para a relação B_2/H anterior, quando $\delta_p = i$ os resultados obtidos pelo método C_2 são coincidentes com os do método R .

Verifica-se, assim, que, independentemente da dimensão B_2/H , as relações $I_a^H/\frac{1}{2}\gamma H^2$ e $\tan \delta$ tomam valores iguais para os métodos R e C_2 quando $\delta = i$.

3.7 Análise paramétrica: influência de e/H

3.7.1 Análises realizadas

Conforme referido na secção 3.5.3.2, atribui-se ao parâmetro e/H a razão pela qual alguns resultados então apresentados diferem das conclusões de Barghouthi (1990). A influência da espessura da base do muro, dada através da razão adimensional e/H , no impulso activo e, consequentemente, na condição de deslizamento, é, assim, analisada na presente secção. O solo é caracterizado por um ângulo de resistência ao corte de 30° e a superfície do terreno suportado é horizontal. As dimensões da estrutura são as presentes na Tabela 3.1, exceptuando a espessura da base e , parâmetro a analisar.

3.7.2 Resultados

Na Figura 3.36 são apresentados os resultados obtidos para o impulso activo horizontal adimensionado. Os resultados obtidos no que diz respeito à condição de deslizamento encontram-se na Figura 3.37. As curvas correspondentes aos métodos R e C_1 não dependem de e/H , pelo que são as mesmas em todos os gráficos apresentados em cada uma das Figuras.

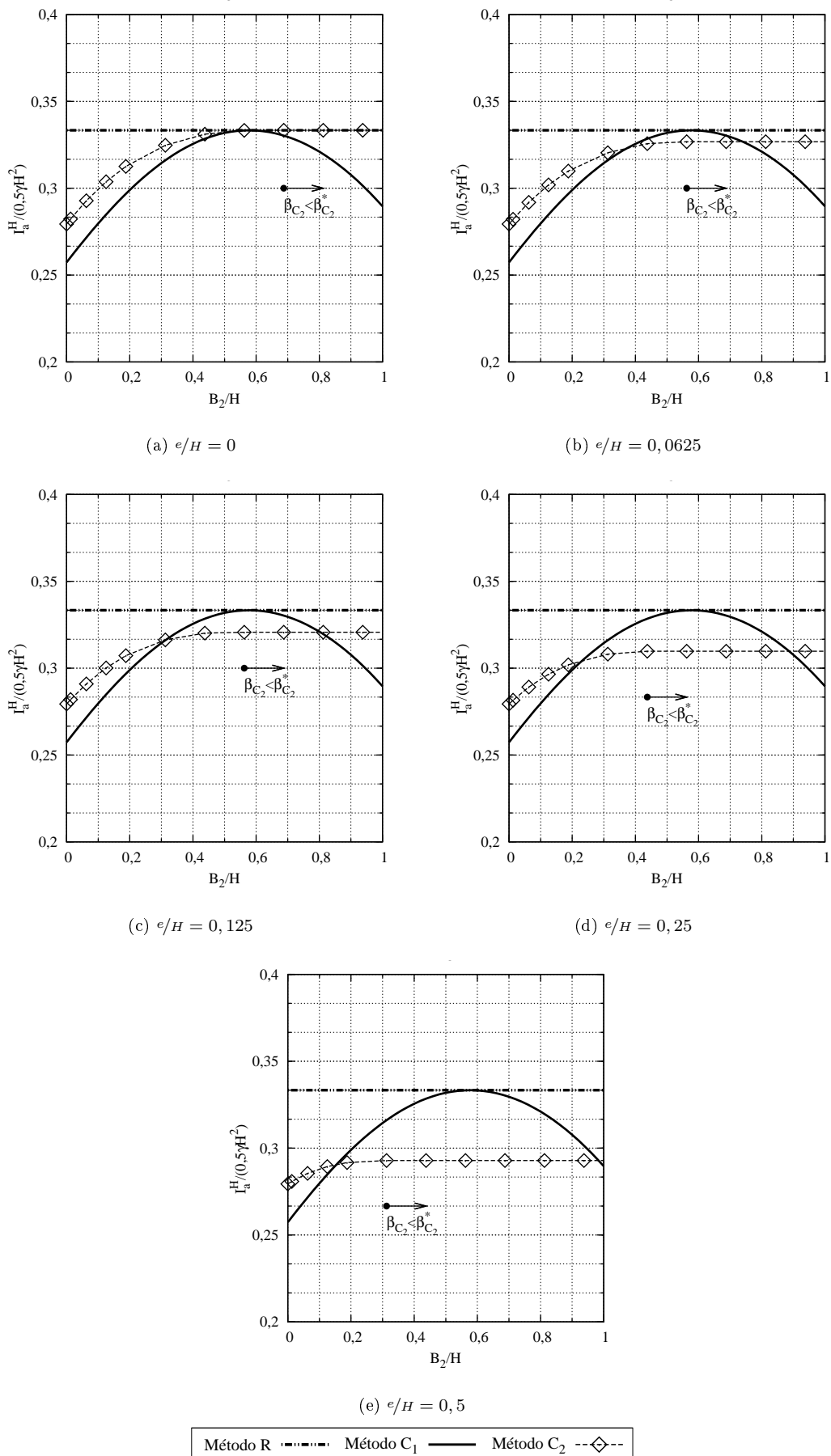


Figura 3.36: Variação do impulso activo adimensionalizado com a largura adimensionalizada do muro para diversos valores de e/H : $\phi' = 30^\circ$; $\delta = 2/3\phi'$; $i = 0^\circ$.

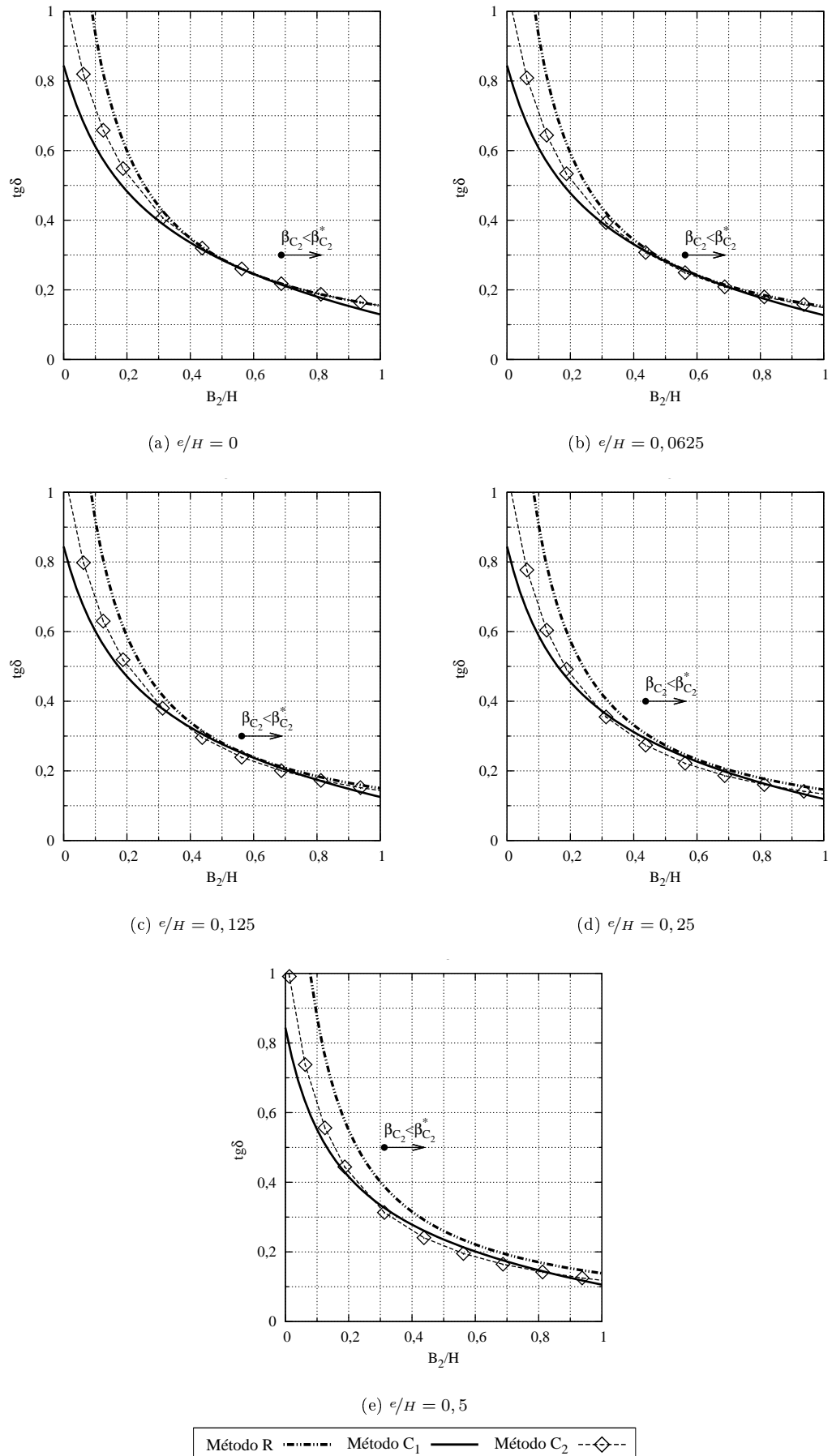


Figura 3.37: Variação da condição de deslizamento com a largura adimensionalizada do muro para diversos valores de e/H : $\phi' = 30^\circ$; $\delta = 2/3\phi'$; $i = 0^\circ$.

3.7.3 Análise dos resultados

Analisando os resultados obtidos relativamente à influência de e/H pode afirmar-se que:

- quando $e/H = 0$ os resultados do impulso activo horizontal coincidem entre os métodos R e C_2 , para $\beta_{C2} \leq \beta_{C2}^*$;
- à medida que a espessura da base do muro aumenta, os resultados do impulso activo horizontal obtidos dos dois métodos referidos tendem a afastar-se;
- os resultados relativos à condição de deslizamento possuem o mesmo comportamento que os resultados obtidos para o impulso activo horizontal. Assim, quando $e/H = 0$ os valores de $\tan \delta$ são coincidentes entre os métodos R e C_2 para $\beta_{C2} < \beta_{C2}^*$. Esta coincidência de valores tende a perder-se com o aumento da espessura da base do muro;
- para o caso analisado, apesar das importantes diferenças entre os impulsos dos métodos C_1 e C_2 , verifica-se uma relativa proximidade nos resultados de $\tan \delta$.

Capítulo 4

Aplicação de método numérico

4.1 Introdução

No Capítulo 3 aplicaram-se os métodos disponíveis para a determinação de impulsos sobre as estruturas de suporte em L ou T invertido a diversos casos de estruturas deste tipo, através de análise paramétrica que incidiu sobre os parâmetros ϕ' , i e B_z/H . No presente capítulo pretende-se fazer uma análise paramétrica, através de elementos finitos, ao problema em causa, considerando os mesmos parâmetros. A interacção entre o solo e a estrutura de suporte é também analisada no presente capítulo através da consideração de diferentes tipos de contacto na interface entre ambos. Os resultados obtidos são comparados com os encontrados através dos métodos tradicionais.

De modo a clarificar o processo de cálculo é apresentado um caso base.

O recurso a métodos numéricos, nomeadamente de elementos finitos é importante para a análise de problemas geotécnicos ao permitir modelar, de forma realisticamente aproximada, o comportamento mecânico do solo, da própria estrutura e da interacção entre ambos.

Plaxis (versão 8) é um programa de cálculo automático, bidimensional, baseado no método de elementos finitos, destinado, especificamente, à análise de deformação e estabilidade de problemas geotécnicos. É este o programa de cálculo automático usado no presente capítulo.

4.2 Modelo constitutivo *Mohr-Coulomb*

O programa *Plaxis* permite simular o comportamento mecânico do solo através de vários modelos, como o elástico-linear, o elástico perfeitamente plástico de *Mohr-Coulomb* ou o modelo elasto-plástico com endurecimento *Hardening soil*. Para as análises executadas no presente capítulo, adopta-se o modelo *Mohr-Coulomb*.

Este modelo necessita de cinco parâmetros: o módulo de *Young* E , o coeficiente de *Poisson* ν , a coesão efectiva c' , o ângulo de resistência ao corte efectivo ϕ' e o ângulo de dilatação ψ .

A Figura 4.1 ilustra um modelo elástico perfeitamente plástico onde a tensão efectiva aumenta de forma elástica-linear até ser atingido o limite da proporcionalidade, mantendo-se depois constante com o aumento da deformação do solo ε .

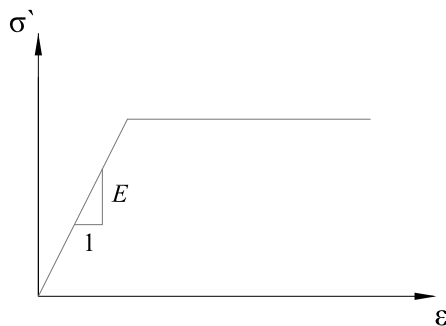


Figura 4.1: Modelo elástico perfeitamente plástico.

A equação que define o caso apresentado na figura acima, antes da plastificação do solo, é dada por:

$$\sigma' = E \times \varepsilon \quad (4.1)$$

Na Figura 4.2 encontra-se representado, de forma gráfica, o critério de cedência de *Mohr-Coulomb*.

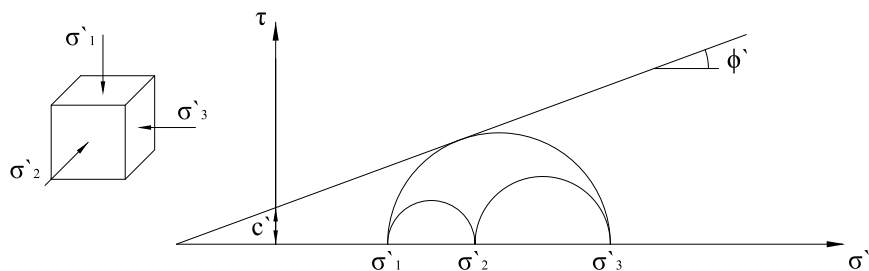


Figura 4.2: Critério de cedência de Mohr-Coulomb (Brinkgreve et al., 2004).

Na Figura 4.3 encontra-se uma representação geral, no espaço das tensões principais, do critério de cedência, em que não é considerada a coesão efectiva do solo.

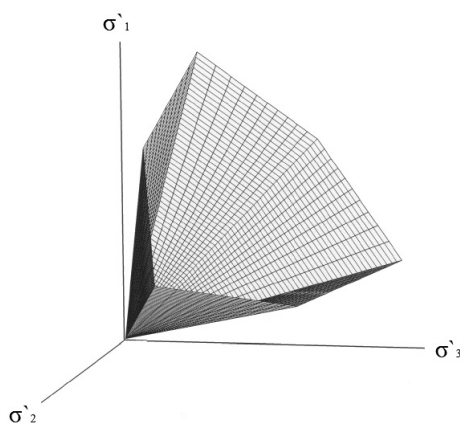


Figura 4.3: Superfície de ruptura do modelo Mohr-Coulomb, no espaço das tensões principais, para solos não coesivos (Brinkgreve et al., 2004).

O ângulo de dilatância é utilizado em análises numéricas para corrigir a excessiva expansão do solo. Segundo Brinkgreve et al. (2004), no caso de análises em areias, o ângulo de dilatância ψ toma valores na ordem de $\psi = \phi' - 30$ para situações em que o ângulo de atrito interno do solo seja superior a

30° , sendo que, para valores de ϕ' inferiores àquele, ψ é assumido como nulo. No entanto, no presente trabalho admite-se a lei de fluxo associada, pelo que o ângulo de dilatância é adoptado com valor igual ao da resistência ao corte ϕ' .

A Tabela 4.1 apresenta os parâmetros necessários para a definição do modelo, classificados de acordo com a designação disposta no programa referido.

Tabela 4.1: Parâmetros utilizados pelo modelo *Mohr-Coulomb*.

Tipo	Parâmetro	Designação	Unidade
Rigidez	E_{ref}	Módulo de <i>Young</i>	kPa
	ν	Coefficiente de <i>Poisson</i>	-
Resistência	c'	Coesão efectiva	kPa
	ϕ'	Ângulo de resistência ao corte	Graus ($^\circ$)
	ψ	Ângulo de dilatância	Graus ($^\circ$)

4.3 Caso base

De modo a exemplificar todo o processo de cálculo, apresenta-se o caso base, comum a todas as análises paramétricas, que serão posteriormente apresentadas.

4.3.1 Descrição do caso base

O muro, em L , é modelado com comportamento elástico linear, sendo o solo modelado através do modelo *Mohr-Coulomb*, referido na secção 4.2 e tendo a camada deste material (com superfície horizontal) uma espessura de 8 metros (Figura 4.4). Sob estes materiais considera-se a existência de um estrato suficientemente rígido, com elevadas características mecânicas, de modo a que se possam supor deslocamentos horizontais e verticais nulos. O muro que suporta o terreno tem as dimensões representadas na Figura 4.4, sendo-lhe permitido o deslocamento horizontal e restringido o deslocamento vertical.

O contacto solo suportado-estrutura é definido através de elementos de interface, caracterizados pelo factor de redução de resistência de interface, R_{inter} . Para as análises efectuadas no caso presente adopta-se $R_{inter} = 2/3$.

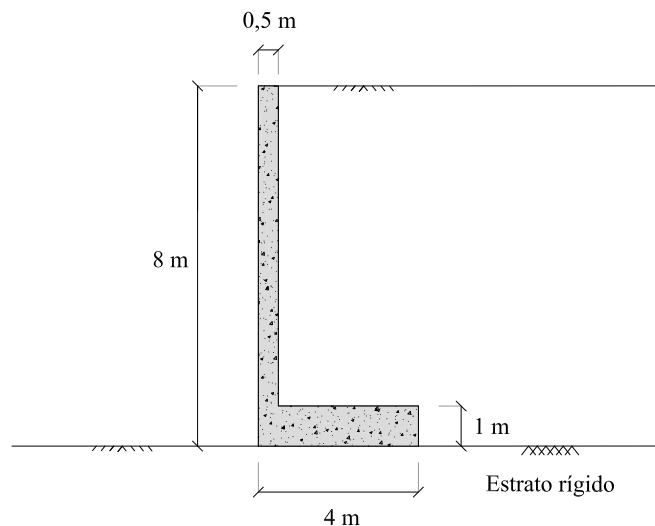


Figura 4.4: Dimensões da estrutura de suporte: modelo de elementos finitos. Caso base.

A malha de elementos finitos utilizada para a definição dos modelos a analisar é composta por elementos de 15 nós num estado plano de deformação. A Figura 4.5 ilustra a referida malha, composta por 1298 elementos e 10738 nós, sendo a sua largura total de 30 metros.

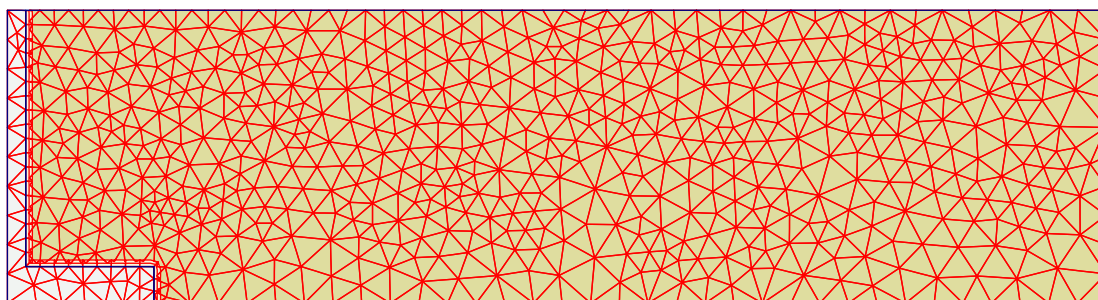


Figura 4.5: Malha do modelo de elementos finitos: caso base.

Na Tabela 4.2 indicam-se os parâmetros necessários para a descrição do comportamento do solo e da estrutura.

Tabela 4.2: Características do solo e estrutura considerados.

Areia (Solo)		Betão (Estrutura de suporte)	
γ_s (kN/m^3)	20	γ_b (kN/m^3)	25
ν	0,3	ν	0,2
K_0	0,5	K_0	0,5
c'	0	E (kPa)	34×10^3
E_{ref} (kPa)	$2,5 \times 10^4$		
ϕ' ($^\circ$)	30		

Segundo o Eurocódigo 2 (EN 1992-1, 2001), para um betão C35/45, utilizado em estruturas de suporte, o valor indicado para o módulo de *Young* E é o apresentado acima (Tabela 4.2). O mesmo código apresenta para o coeficiente de *Poisson* ν o valor disposto na mesma tabela, considerado para um betão não fendilhado.

Por forma a mobilizar o estado activo do solo é imposto, à estrutura, um deslocamento horizontal d , no sentido oposto ao terreno suportado. Os deslocamentos são incrementados em múltiplos de 5 mm até se atingir um valor mínimo (estabilizado) da componente horizontal do impulso. A partir desse valor qualquer aumento de deslocamento horizontal não tem influência significativa no resultado do impulso. Define-se como critério de paragem a obtenção de um valor do impulso inferior a 1% do precedente, ou seja, quando se verifica que:

$$100 - \left(\frac{I_{i+1}}{I_i} \times 100 \right) < 1\% \quad (4.2)$$

Os impulsos horizontais são determinados por integração das tensões de direcção horizontal nos contactos (elementos de interface) solo-estrutura, sendo as cargas verticais obtidas através da integração do diagrama de tensões de direcção vertical na base do muro.

4.3.2 Resultados e análise

No que respeita ao caso base, conforme se pode observar na Figura 4.6, o impulso estabiliza quando se impõe um deslocamento horizontal de 15 mm . Confirma-se também que a imposição de um deslocamento de 20 mm não revela influência significativa no valor do impulso.

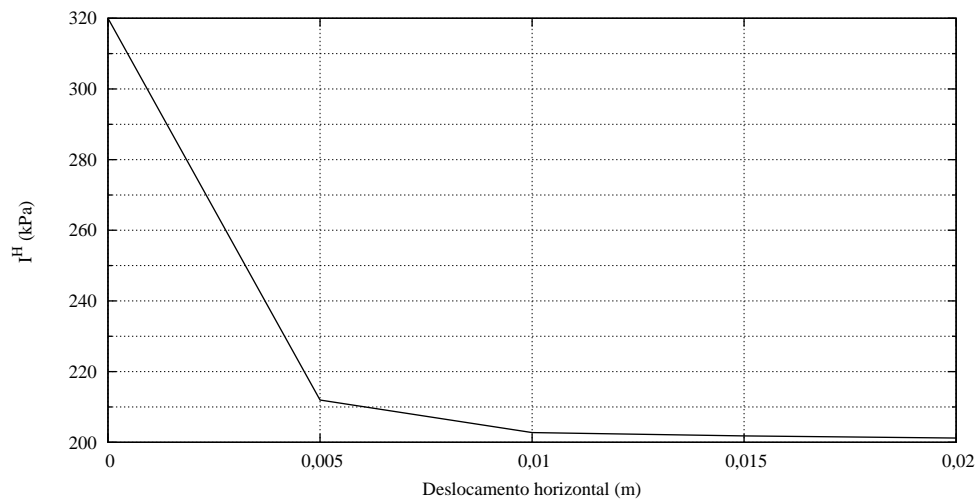


Figura 4.6: Representação do impulso horizontal em função do deslocamento horizontal: caso base.

A relação entre as cargas horizontais e verticais (representada por $\tan \delta$ e apresentada na secção 3.4) estabiliza também com a imposição de um deslocamento horizontal à estrutura de 15 mm (Figura 4.7), não tendo o deslocamento aplicado posteriormente (20 mm) efeito significativo no resultado obtido.

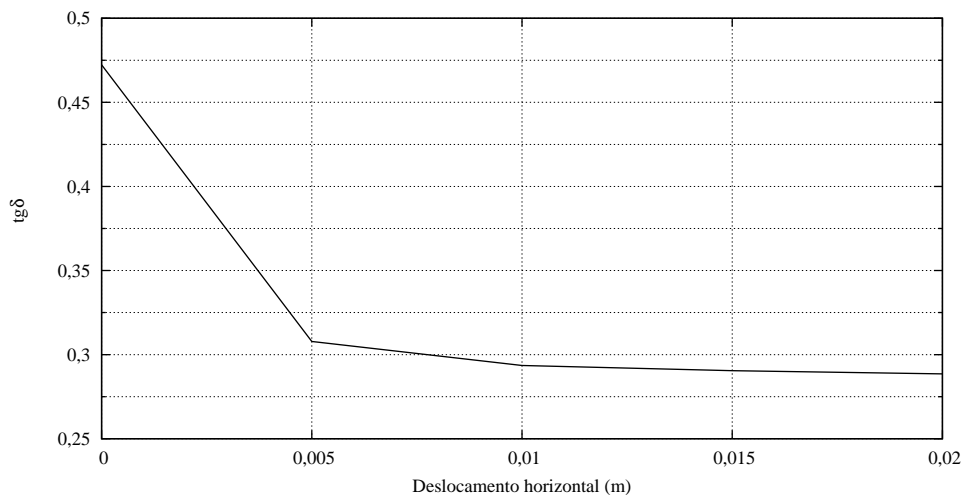


Figura 4.7: Representação da relação entre as cargas horizontais e verticais (condição de deslizamento do muro) em função do deslocamento horizontal: caso base.

A Figura 4.8 apresenta a deformada originada para o caso base e para o deslocamento de 15 mm . A Figura 4.9 mostra os deslocamentos horizontais. Nesta figura (4.9) pode notar-se a posição da superfície que define o paramento virtual, assim como a superfície que define a cunha activa.

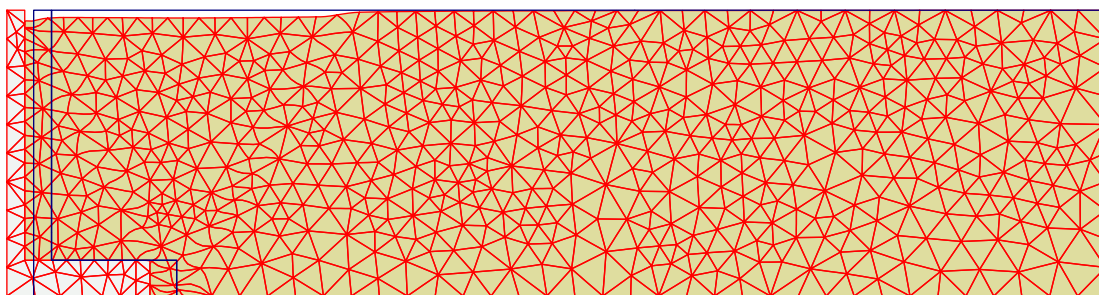


Figura 4.8: Representação da deformação do solo após a imposição do deslocamento horizontal ($d = 15\text{ mm}$): caso base.

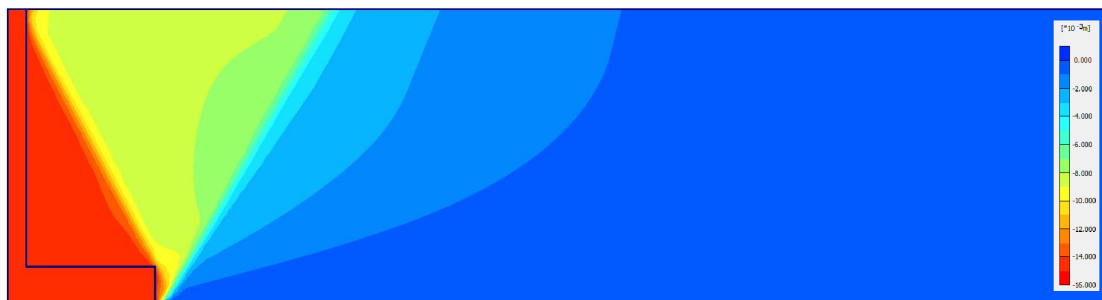


Figura 4.9: Representação, por gradação de cores, dos deslocamentos horizontais no maciço ($d = 15\text{ mm}$): caso base.

A Tabela 4.3 indica os resultados obtidos para o caso base no que diz respeito ao impulso activo, na sua componente horizontal, à resultante das cargas verticais e às razões adimensionais da acção e da condição de deslizamento. Na mesma tabela encontram-se também os resultados obtidos através dos métodos precedentes, considerando as características do caso base apresentado.

Tabela 4.3: Resultados obtidos através dos diferentes métodos: $I_a^H/\frac{1}{2}\gamma H^2$ e $\tan \delta$. Caso base: $\frac{B_2}{H} = 0,438$; $\phi' = 30^\circ$; $R_{inter} = \frac{2}{3}$; $i = 0^\circ$.

Método	I_a^H [kN/m]	$I_a^H/\frac{1}{2}\gamma H^2$	V [kN/m]	$\tan \delta$
R	213,3	0,333	677,5	0,315
C_1	210,2	0,328	687,3	0,306
C_2	204,9	0,320	693,3	0,296
Método numérico	201,8	0,314	690,8	0,292

No que diz respeito aos resultados do impulso activo e da condição de deslizamento obtidos, pode-se afirmar que estes se revelam bastante próximos dos obtidos através dos métodos tradicionais. Não obstante, os resultados obtidos pelo método R mostram-se superiores aos restantes.

As superfícies a que se fez referência anteriormente, a propósito da Figura 4.9, são igualmente visíveis através da representação dos pontos plásticos, que se verifica estarem concentrados em bandas. Na Figura 4.10 apresentam-se os pontos plásticos para os vários deslocamentos do muro, sobrepondo-se as superfícies que definem o paramento virtual do muro obtidas através do método C_2 . Essas superfícies são identificadas pelas inclinações β_{C2,I_a^H} e $\beta_{C2,\tan \delta}$, que resultam da maximização da componente horizontal do impulso activo e da condição de deslizamento, respectivamente. Complementarmente, sobrepõem-se as superfícies obtidas através da expressão 2.15 (Barghouthi, 1990), presente na secção 2.4.3. Na Figura 4.10 apenas é apresentada a área em que se encontra o muro e os pontos plastificados do solo, uma vez que a restante área do terreno não sofre qualquer tipo de plastificação relevante.

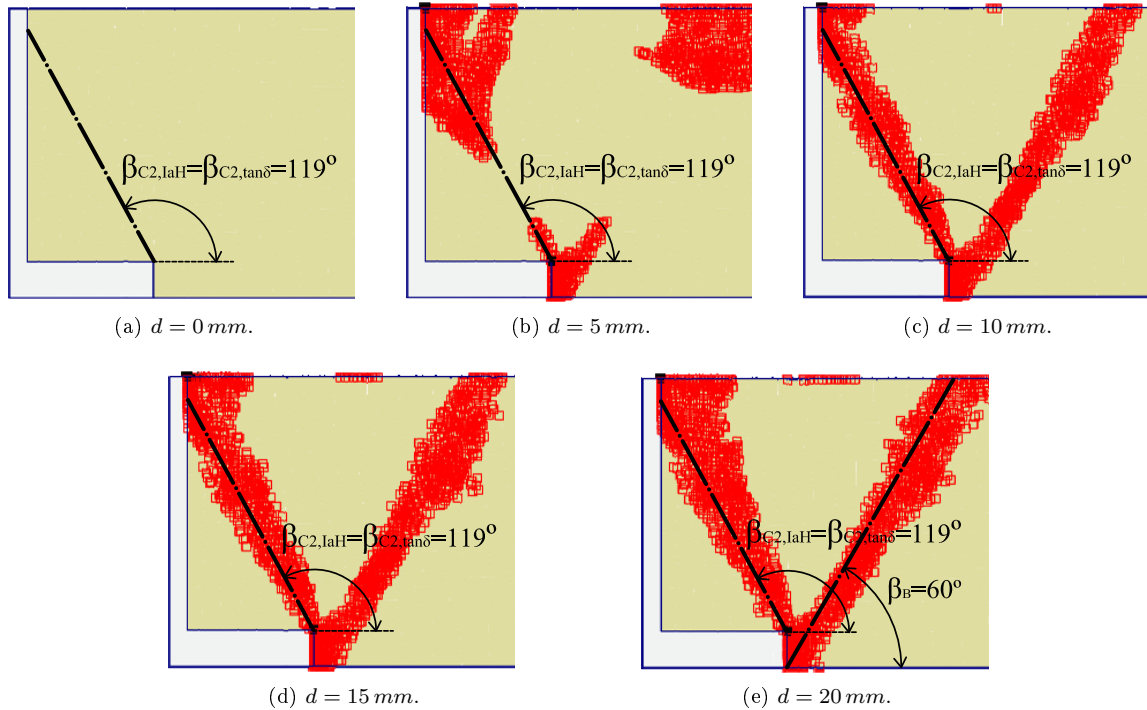


Figura 4.10: Representação dos pontos plásticos em função do deslocamento aplicado para $B_1 = 4 \text{ m}$ ($\frac{B_2}{H} = 0,438$); $\phi' = 30^\circ$; $R_{inter} = \frac{2}{3}$; $i = 0^\circ$. Sobreposição das superfícies que decorrem do método C_2 .

Os resultados mostram que a superfície composta pelos pontos plastificados fica definida para o

deslocamento horizontal inferior ao correspondente à estabilização do impulso activo. Essa superfície é, para o caso base, muito próxima da obtida através do método C_2 .

Note-se, finalmente, que no caso escolhido como base, havia uma razoável coincidência entre os resultados dos métodos R , C_1 e C_2 , conforme se pode ver na Tabela 4.3 e verificar no Capítulo 3. Os resultados numéricos obtidos são, por sua vez, também semelhantes àqueles.

4.4 Análise paramétrica

4.4.1 Descrição dos casos analisados

Para a presente análise paramétrica, o processo de cálculo é idêntico ao do caso base. Adoptam-se as dimensões ilustradas na Figura 4.4 para a estrutura e variam-se os valores relativos à resistência ao corte do solo, à inclinação da superfície do terreno e ao factor de redução presente no contacto solo-estrutura, ϕ' , i e R_{inter} , respectivamente. A influência do comprimento da base da estrutura (B_1) é também alvo de análise, pelo que os valores referentes àquela são variados, combinando-os com os restantes parâmetros. A Tabela 4.4 apresenta todos os parâmetros a analisar, expondo-se as combinações com os restantes.

Tabela 4.4: Análises realizadas.

Parâmetro a analisar	R_{inter}	$\phi' (^{\circ})$	$B_1 (m) \left[\frac{B_2}{H} \right]$	$i (^{\circ})$
R_{inter}	$0; \frac{1}{3}; \frac{1}{2}; \frac{2}{3}; 1$	30	$4 \left[\frac{3,5}{8} = 0,438 \right]$	$0; 5; 10; 15; 20$
$\phi' (^{\circ})$	$\frac{2}{3}$	$20; 25; 30;$ $35; 40; 45$	$4 [0,438]$	$0; 5; 10; 15; 20$
$B_1 (m) \left[\frac{B_2}{H} \right]$	$\frac{2}{3}$	$30; 40; 45$	$0,5[0]; 0,6[0,013]; 1[0,063];$ $1,5[0,125]; 2[0,188]; 3[0,313];$ $4[0,438]; 5[0,563]; 6[0,688];$ $7[0,813]; 8[0,938]; 9[1,063]; 10[1,188]$	0 a 35 , com máximo de $\phi' - 5^{\circ}$
$i (^{\circ})$	$\frac{2}{3}$	30	$4 [0,438]$	0 a 25

O estudo baseia-se nos resultados de $(4 \times 5) + (5 \times 5) + (13 \times 16) + (12 \times 6) + 6 = 331$ cálculos, cobrindo um leque considerável de situações distintas.

4.4.2 Análise da influência do factor R_{inter}

4.4.2.1 Análises realizadas

Para o estudo da influência do factor de redução, presente no contacto solo-estrutura, é considerado um solo caracterizado com um ângulo de resistência ao corte de 30° . As dimensões da estrutura adoptadas para a análise presente são as dispostas na Figura 4.4. Para as mesmas condições do solo e do muro, são consideradas diferentes inclinações da superfície do terreno suportado, com a finalidade de se analisar também a evolução do impulso activo (dado pela relação $I_a^H / 1/2 \gamma H^2$) e da condição de deslizamento do muro (dada por $\tan \delta$) com o aumento daquela inclinação.

4.4.2.2 Resultados

Os resultados obtidos, no que diz respeito ao impulso activo, para o tipo de solo considerado, são apresentados na Figura 4.11 em função do parâmetro R_{inter} . Os resultados são sobrepostos aos obtidos através dos métodos clássicos, por forma a poderem comparar-se entre si.

Na Figura 4.12 encontram-se os resultados referentes à evolução da condição de deslizamento do muro (dada por $\tan \delta$), em função do parâmetro analisado.

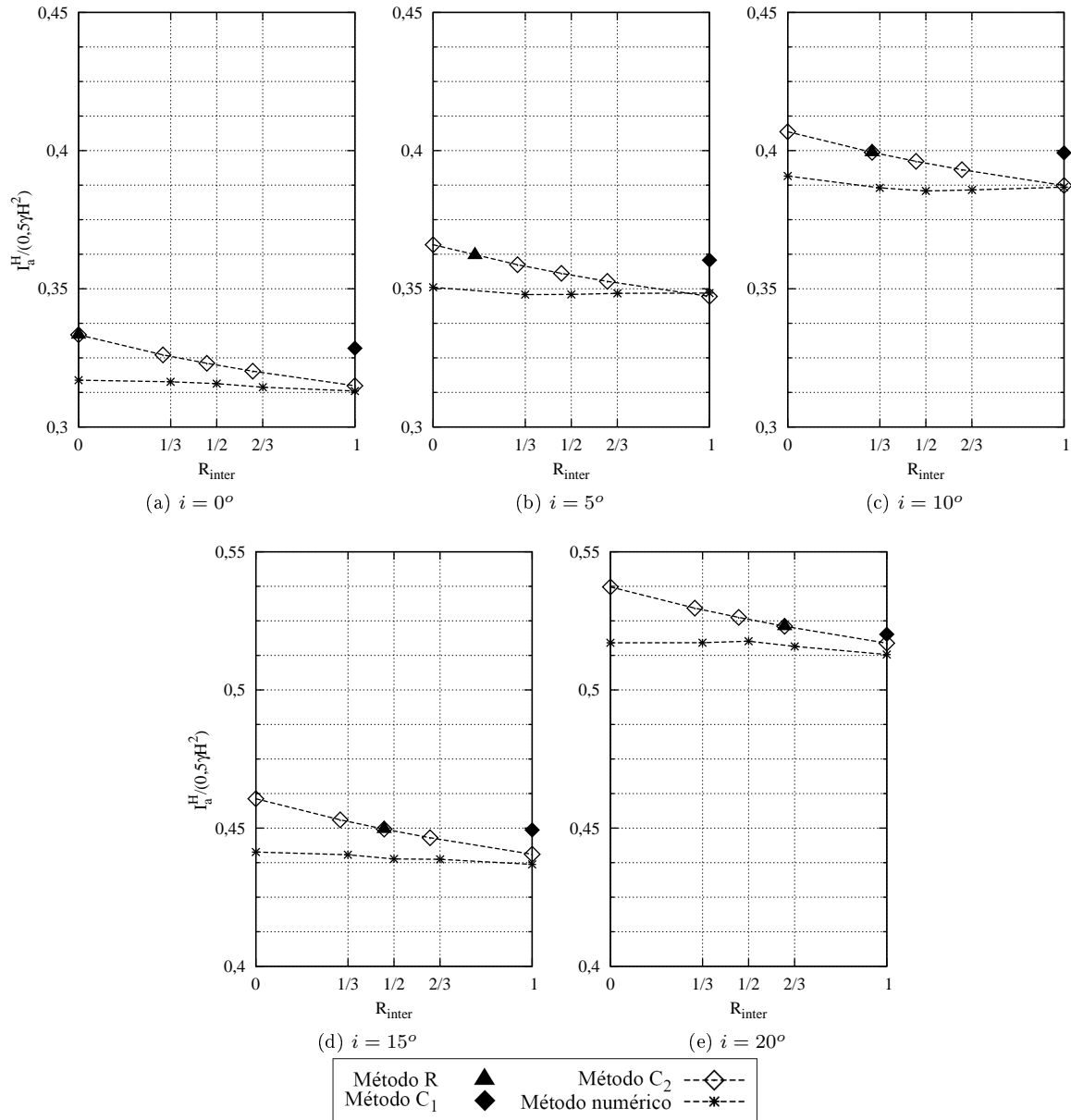


Figura 4.11: Influência do factor R_{inter} no impulso activo horizontal para $\frac{B_2}{H} = 0,438$; $\phi' = 30^\circ$. Comparação com os métodos clássicos.

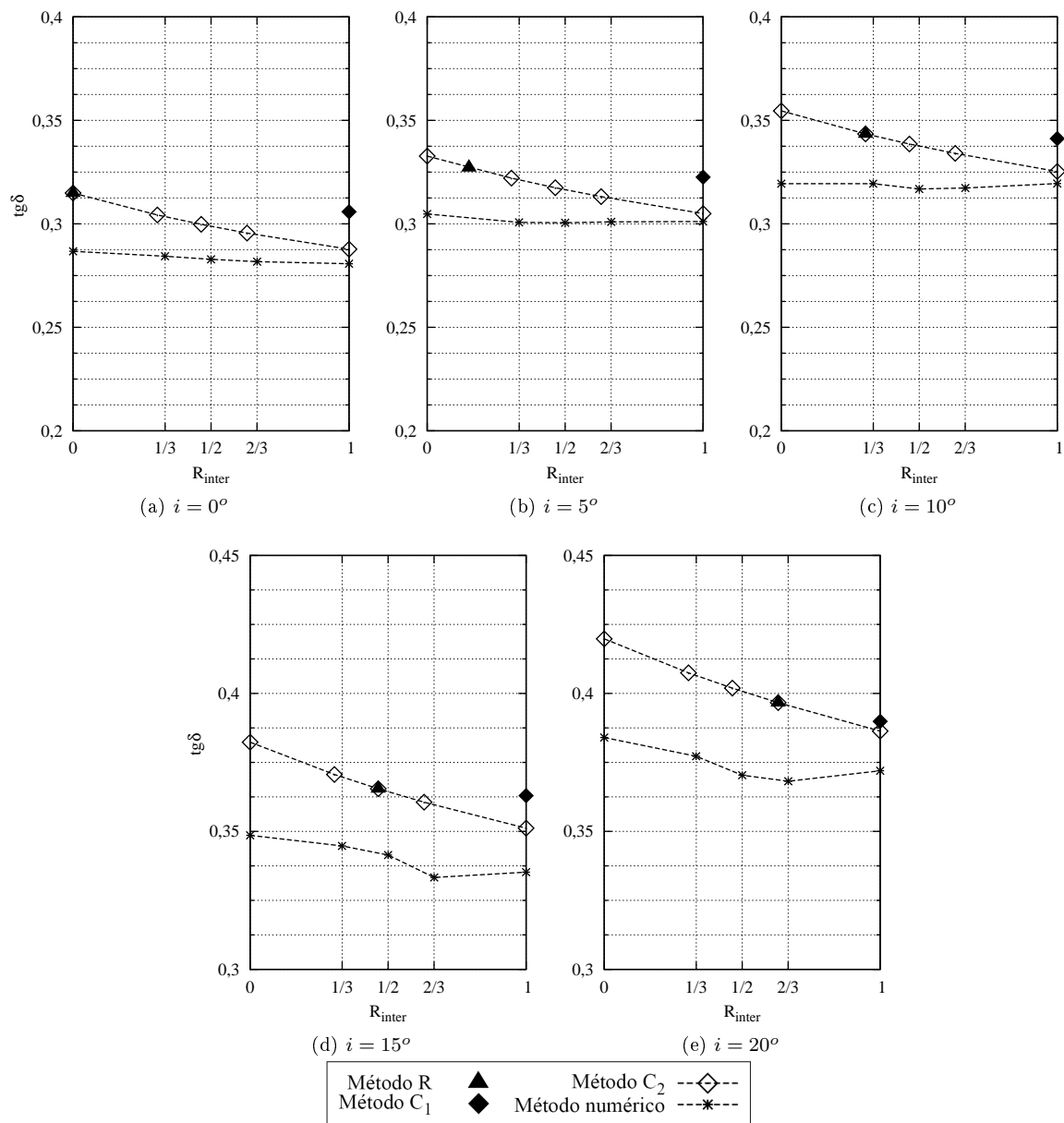


Figura 4.12: Influência do factor R_{inter} na condição de deslizamento do muro para $\frac{B_2}{H} = 0,438$; $\phi' = 30^\circ$. Comparação com os métodos clássicos.

Apresentam-se duas Figuras em que se ilustram os pontos plásticos obtidos pelo método numérico, verificando-se que formam bandas. Uma (Figura 4.13) em que $i = 0^\circ$ e outra em que $i = 15^\circ$ (Figura 4.14). As superfícies são apresentadas em função do factor R_{inter} adoptado, sobrepondo-se àquelas as obtidas através do método C_2 .

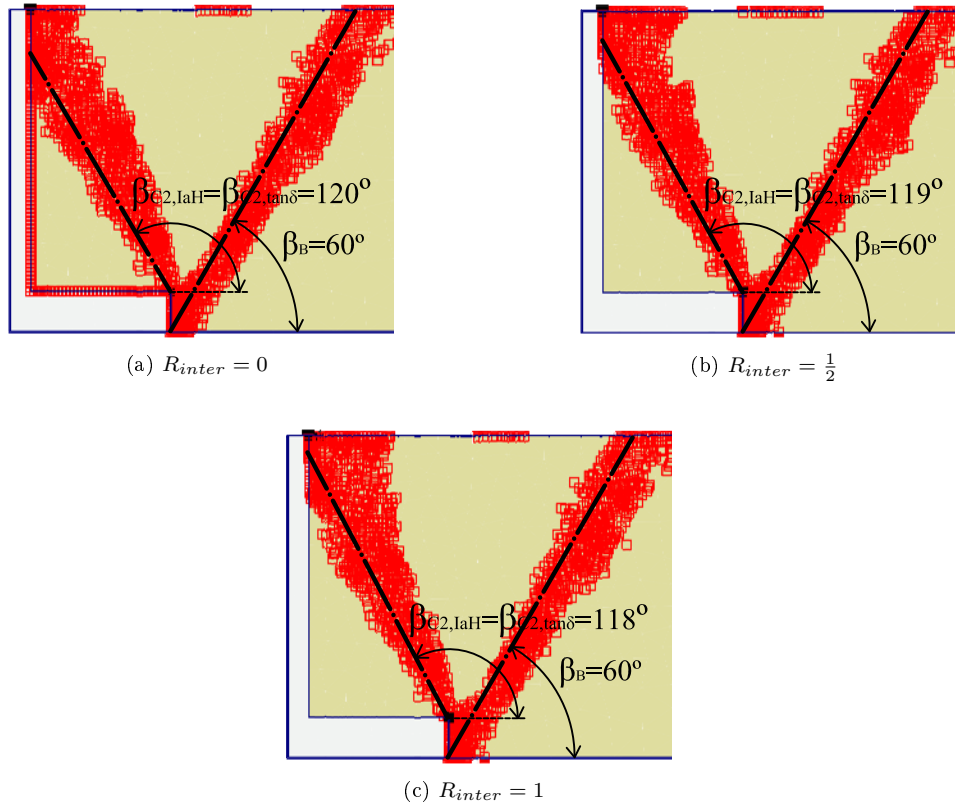


Figura 4.13: Representação dos pontos plásticos em função de R_{inter} para $B_1 = 4m$; $\phi' = 30^\circ$; $i = 0^\circ$. Sobreposição das superfícies resultantes da aplicação do método C_2 .

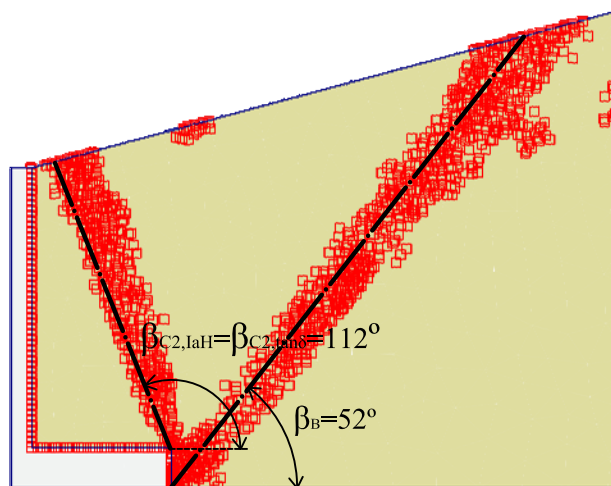
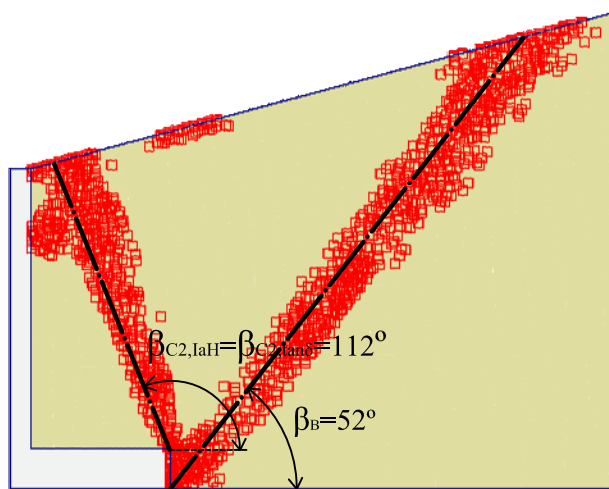
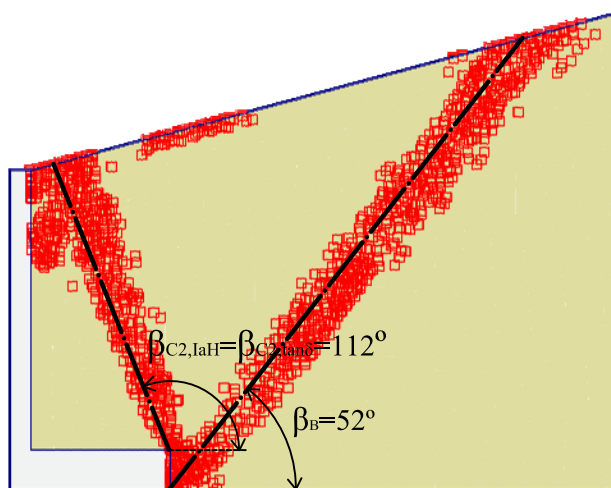
(a) $R_{inter} = 0$ (b) $R_{inter} = \frac{1}{2}$ (c) $R_{inter} = 1$

Figura 4.14: Representação dos pontos plásticos em função de R_{inter} para $B_1 = 4m$; $\phi' = 30^\circ$; $i = 15^\circ$. Sobreposição das superfícies resultantes da aplicação do método C_2 .

4.4.2.3 Análise dos resultados

Para o caso da relação B_2/H estudada, pode afirmar-se que não existe coincidência da evolução de I_a^H e de $\tan \delta$ com o parâmetro R_{inter} entre o método C_2 e o método numérico. No que respeita ao método C_2 , o aumento de R_{inter} implica a diminuição dos resultados de I_a^H e de $\tan \delta$, ao passo que no método numérico aquele parâmetro parece ter efeito muito reduzido, não havendo praticamente variação daquelas grandezas com R_{inter} (as excepções verificam-se para $i \geq 15^\circ$). Pela análise dos resultados constata-se que os valores de I_a^H dados pelo método C_2 são maiores do que os obtidos pelo método numérico, sendo próximos quando $R_{inter} = 1$.

Não obstante, as Figuras 4.11 e 4.12 mostram uma influência pequena de R_{inter} nos resultados.

Do mesmo modo, pela análise das Figuras 4.13 e 4.14, verifica-se que a alteração do factor de redução R_{inter} não produz influência significativa nas superfícies obtidas através dos pontos plásticos. Independentemente do valor de i , as superfícies definidas por β_{C2, I_a^H} e $\beta_{C2, \tan \delta}$ mostram-se coincidentes entre si e semelhantes às bandas obtidas numericamente. Pela análise das superfícies obtidas por Barghouthi percebe-se que aquelas são próximas das bandas formadas pelos pontos plásticos.

4.4.3 Análise da influência do ângulo de resistência ao corte do solo, ϕ'

4.4.3.1 Análises realizadas

Para a presente análise, é considerado um factor de redução R_{inter} de $2/3$, variando-se o valor da resistência ao corte do solo, dada por ϕ' . Para as mesmas condições do solo e do muro, são consideradas diferentes inclinações da superfície do terreno suportado, com a finalidade de se analisar também a evolução do impulso activo e da condição de deslizamento do muro com o aumento daquela inclinação.

4.4.3.2 Resultados

A Figura 4.15 apresenta a evolução do impulso activo, dada pela razão adimensional $I_a^H/1/2\gamma H^2$, em função da resistência ao corte do solo ϕ' . Os resultados são sobrepostos aos obtidos através dos métodos clássicos, por forma a poderem comparar-se entre si.

Na Figura 4.16 encontram-se presentes os resultados referentes à evolução da condição de deslizamento do muro, dada por $\tan \delta$, em função do parâmetro ϕ' .

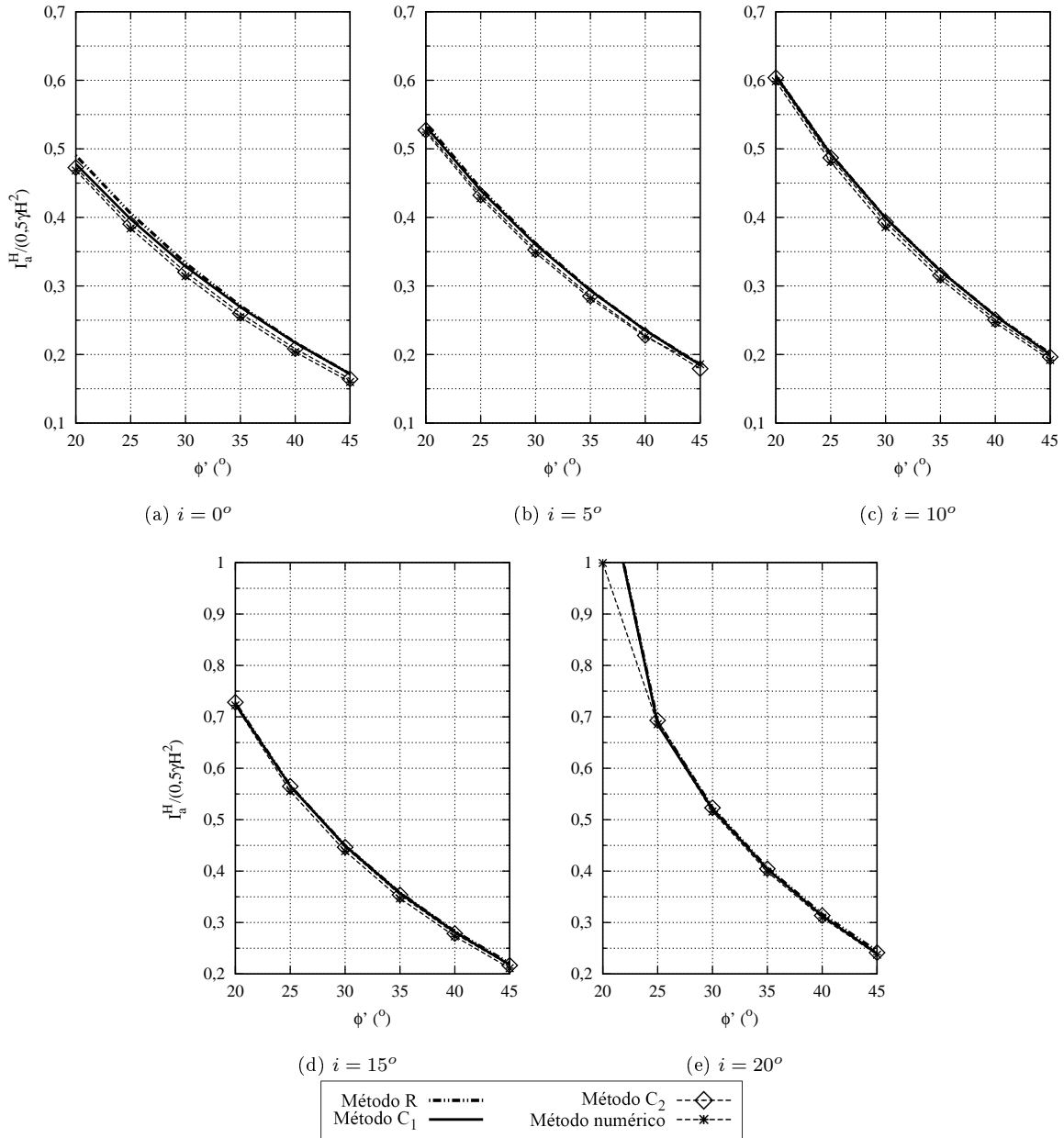


Figura 4.15: Influência do ângulo de resistência ao corte ϕ' no impulso activo horizontal para $\frac{B_2}{H} = 0,438$; $R_{inter} = \frac{2}{3}$. Comparação com os métodos clássicos.

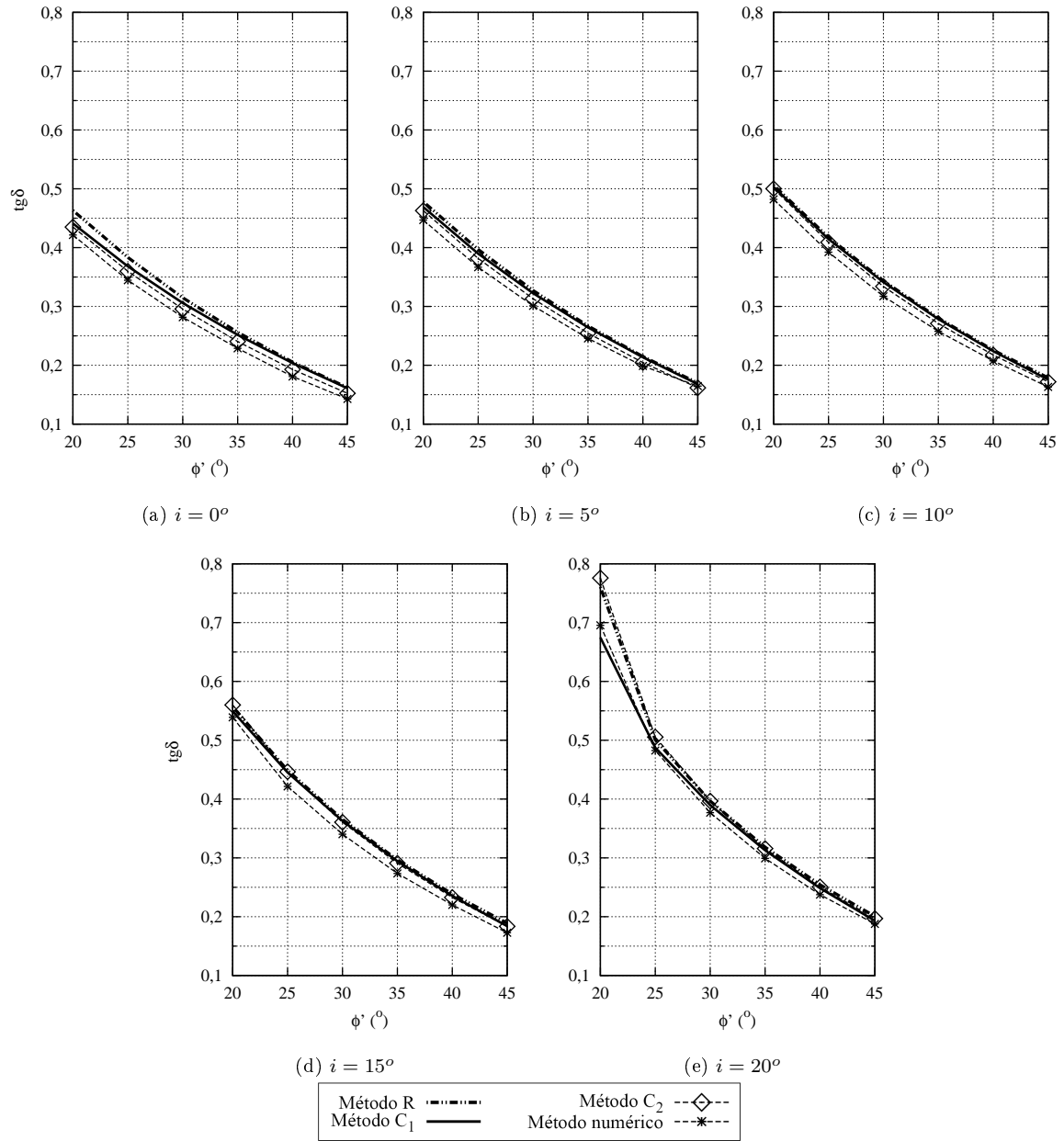


Figura 4.16: Influência do ângulo de resistência ao corte ϕ' na condição de deslizamento do muro para $\frac{B_2}{H} = 0,438$; $R_{inter} = \frac{2}{3}$. Comparação com os métodos clássicos.

As superfícies obtidas através dos pontos plásticos são apresentadas nas Figuras 4.17 e 4.18, em função da resistência ao corte do solo ϕ' , com inclinações $i = 0^\circ$ e $i = 15^\circ$, respectivamente. A estas são sobrepostas as obtidas através do método C_2 por forma a serem comparadas.

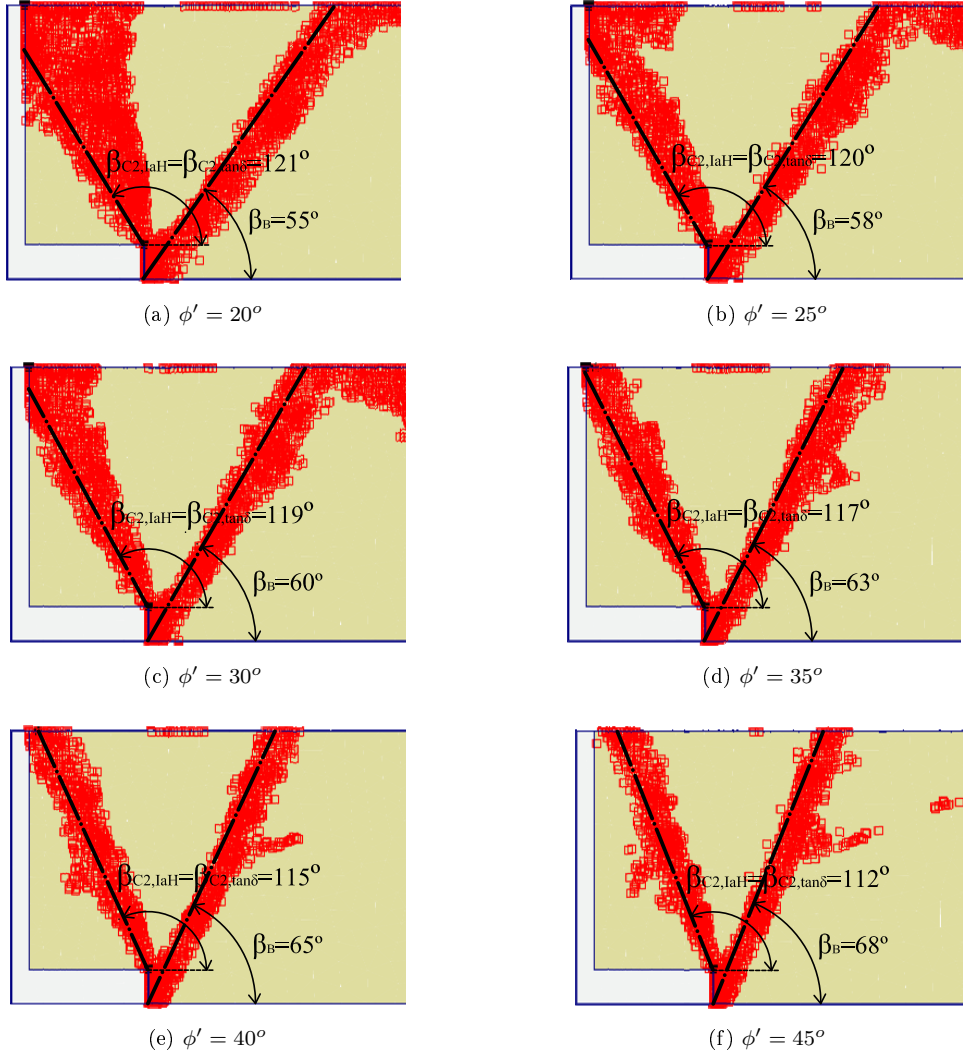


Figura 4.17: Representação dos pontos plásticos em função de ϕ' para $B_1 = 4\text{ m}$; $R_{inter} = 2/3$; $i = 0^\circ$. Sobreposição das superfícies resultantes da aplicação do método C_2 .

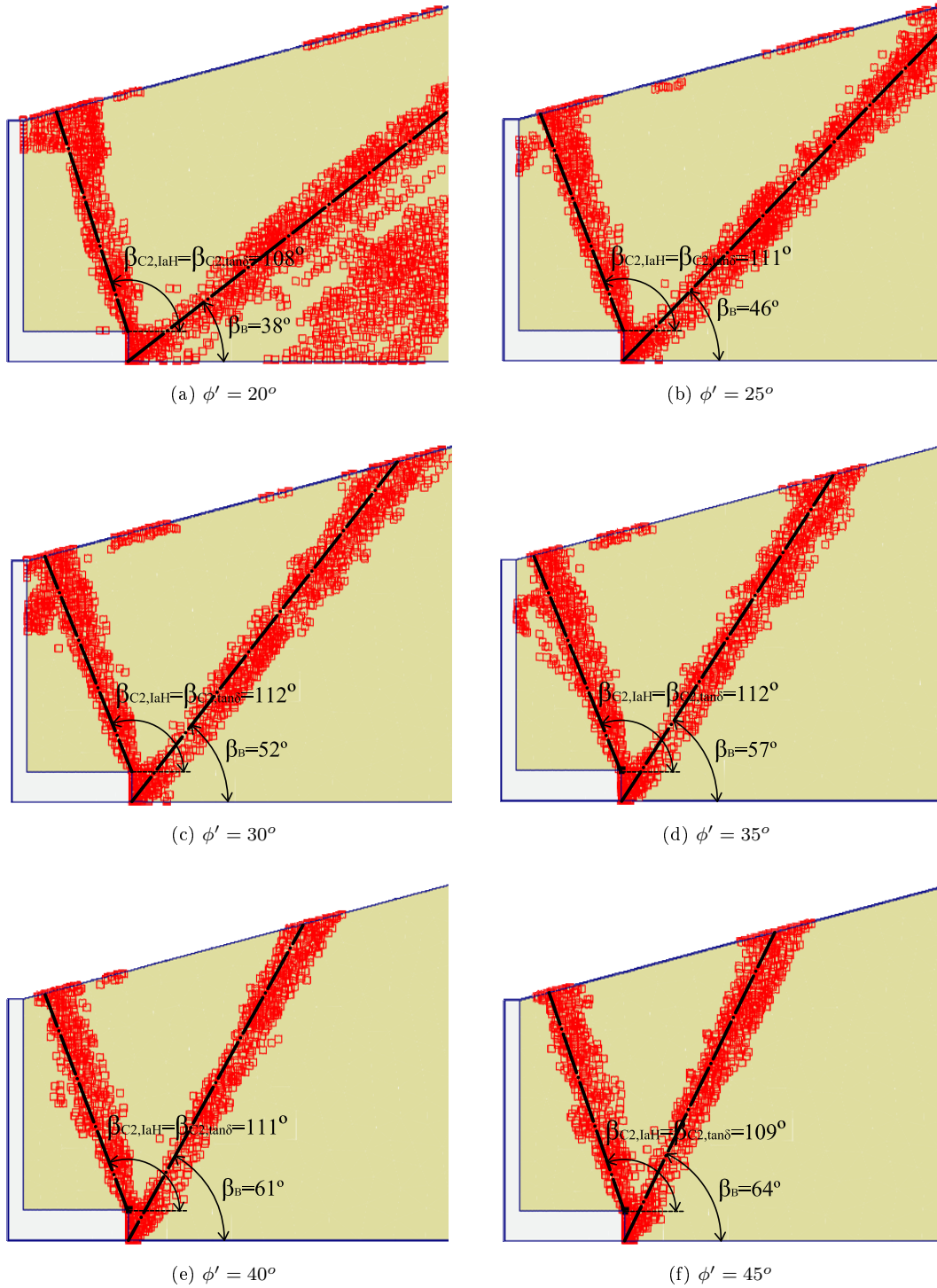


Figura 4.18: Representação dos pontos plásticos em função de ϕ' para $B_1 = 4\text{ m}$; $R_{inter} = 2/3$; $i = 15^\circ$. Sobreposição das superfícies resultantes da aplicação do método C_2 .

4.4.3.3 Análise dos resultados

Para o caso da relação de B_2/H considerada pode afirmar-se que existe quase coincidência entre os resultados numéricos e os obtidos através dos métodos R , C_1 e C_2 . Os resultados mostram, por outro lado, a considerável influência do ângulo de resistência ao corte do solo nos valores de I_a^H e de $\tan \delta$, sendo os maiores valores daquelas relações obtidos para ângulos de resistência ao corte pequenos.

Analisando as Figuras em que se apresentam as superfícies formadas pelos pontos plásticos, às quais são sobrepostas as obtidas através do método C_2 (Figuras 4.17 e 4.18), percebe-se que os métodos são bastante semelhantes, com as superfícies definidas por $\beta_{C_2, \tan \delta}$ a revelarem-se coincidentes às definidas por β_{C_2, I_a^H} , ambas claramente aproximadas às bandas obtidas numericamente. As superfícies obtidas por Barghouthi (1990) também se revelam semelhantes às bandas formadas pelos pontos plásticos.

4.4.4 Análise da influência do comprimento da base da estrutura B_1

4.4.4.1 Análises realizadas

Na presente secção, pretende-se conhecer a influência que o comprimento da base do muro tem no impulso activo e, conseqüentemente, na condição de deslizamento daquela estrutura. Assim, para o estudo da influência deste parâmetro, dado por B_1 , são considerados terrenos com diferentes resistências e inclinações sendo o único parâmetro comum a todas as análises presentes o factor de redução R_{inter} , considerado igual a $2/3$. As dimensões do muro adoptadas são as ilustradas na Figura 4.4 excepto o comprimento da base, parâmetro a analisar. A influência do parâmetro B_1 é dada através da razão adimensional B_2/H .

4.4.4.2 Resultados

Nas Figuras 4.19 a 4.28 apresenta-se a evolução do impulso activo adimensionalizado em função do comprimento da base do muro (também adimensionalizado) para vários valores de inclinação do terreno e vários valores do ângulo de resistência ao corte do solo. Assim, na Figura 4.19 apresentam-se os resultados para $\phi' = 30^\circ$. Nas Figuras 4.20 e 4.21 apresentam-se os resultados para $\phi' = 40^\circ$ e nas Figuras 4.22 e 4.23 apresentam-se os resultados para $\phi' = 45^\circ$.

Nas Figuras 4.24 a 4.28 apresenta-se a evolução da condição de deslizamento do muro, adimensionalizada, em função do comprimento, também adimensionalizado, da base do muro para vários valores de inclinação do terreno e do ângulo de resistência ao corte do solo. Assim, na Figura 4.24 encontram-se representados os resultados para $\phi' = 30^\circ$. Nas Figuras 4.25 e 4.26 encontram-se os resultados para $\phi' = 40^\circ$ e nas Figuras 4.27 e 4.28 encontram-se os resultados para $\phi' = 45^\circ$.

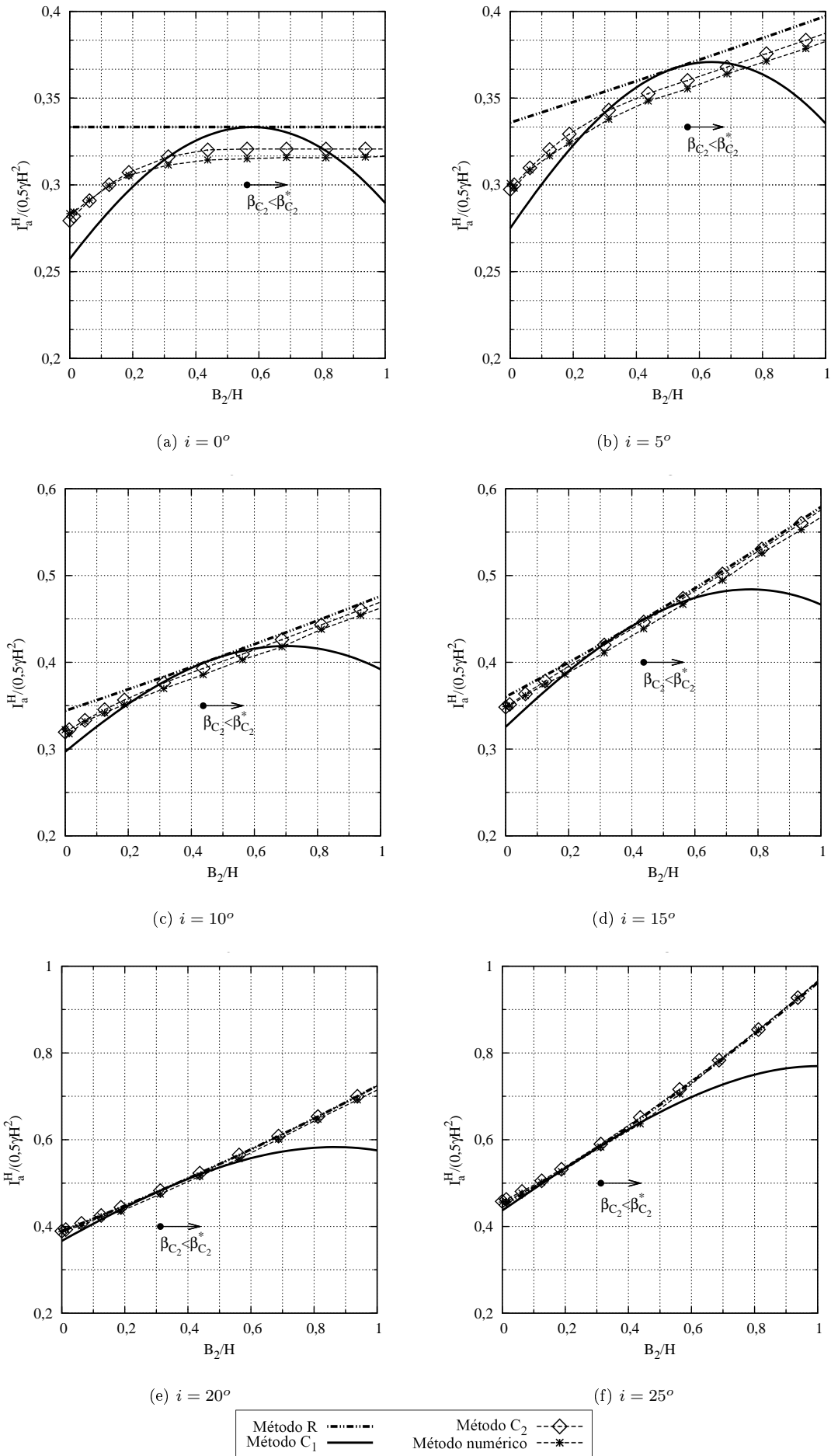


Figura 4.19: Variação do impulso activo horizontal, adimensionalizado, com a largura adimensionalizada do muro para diversas inclinações do terreno e $R_{inter} = 2/3$; $\phi' = 30^\circ$. Comparação com os métodos clássicos.

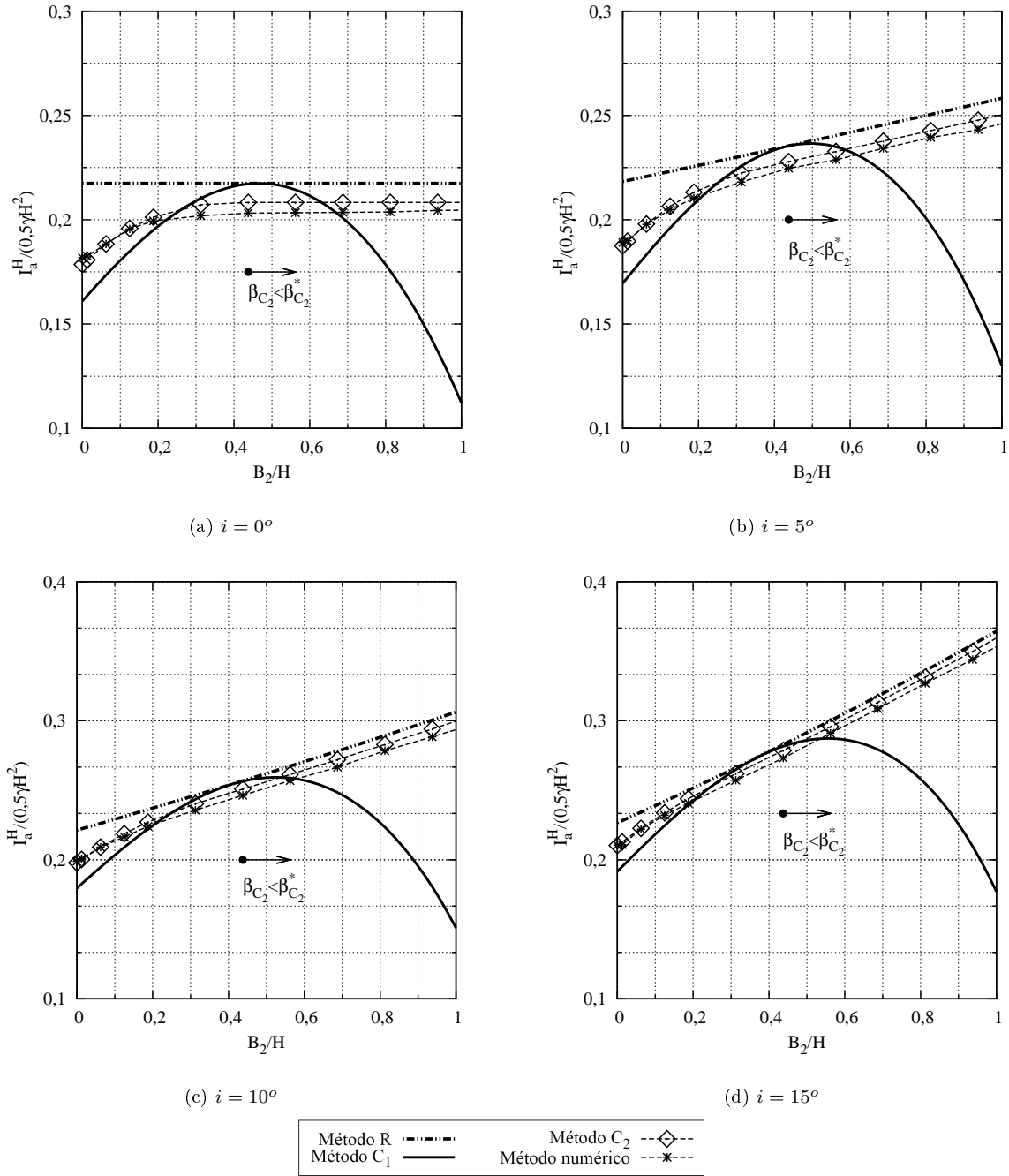


Figura 4.20: Variação do impulso activo horizontal, adimensionalizado, com a largura adimensionalizada do muro para diversas inclinações do terreno e $R_{inter} = 2/3$; $\phi' = 40^\circ$. Comparação com os métodos clássicos.

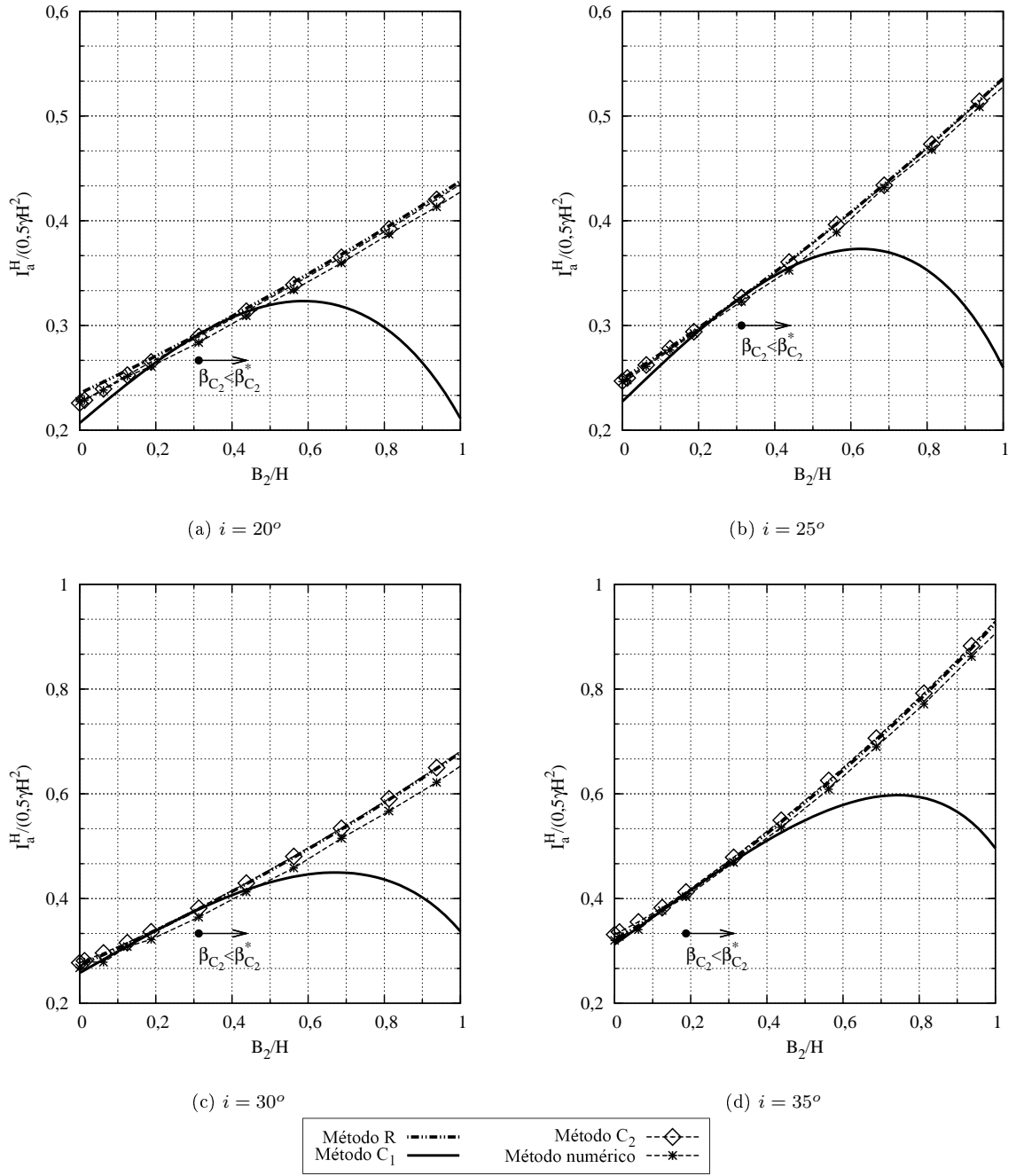


Figura 4.21: Variação do impulso activo horizontal, adimensionalizado, com a largura adimensionalizada do muro para diversas inclinações do terreno e $R_{inter} = 2/3$; $\phi' = 40^\circ$. Comparação com os métodos clássicos (continuação).

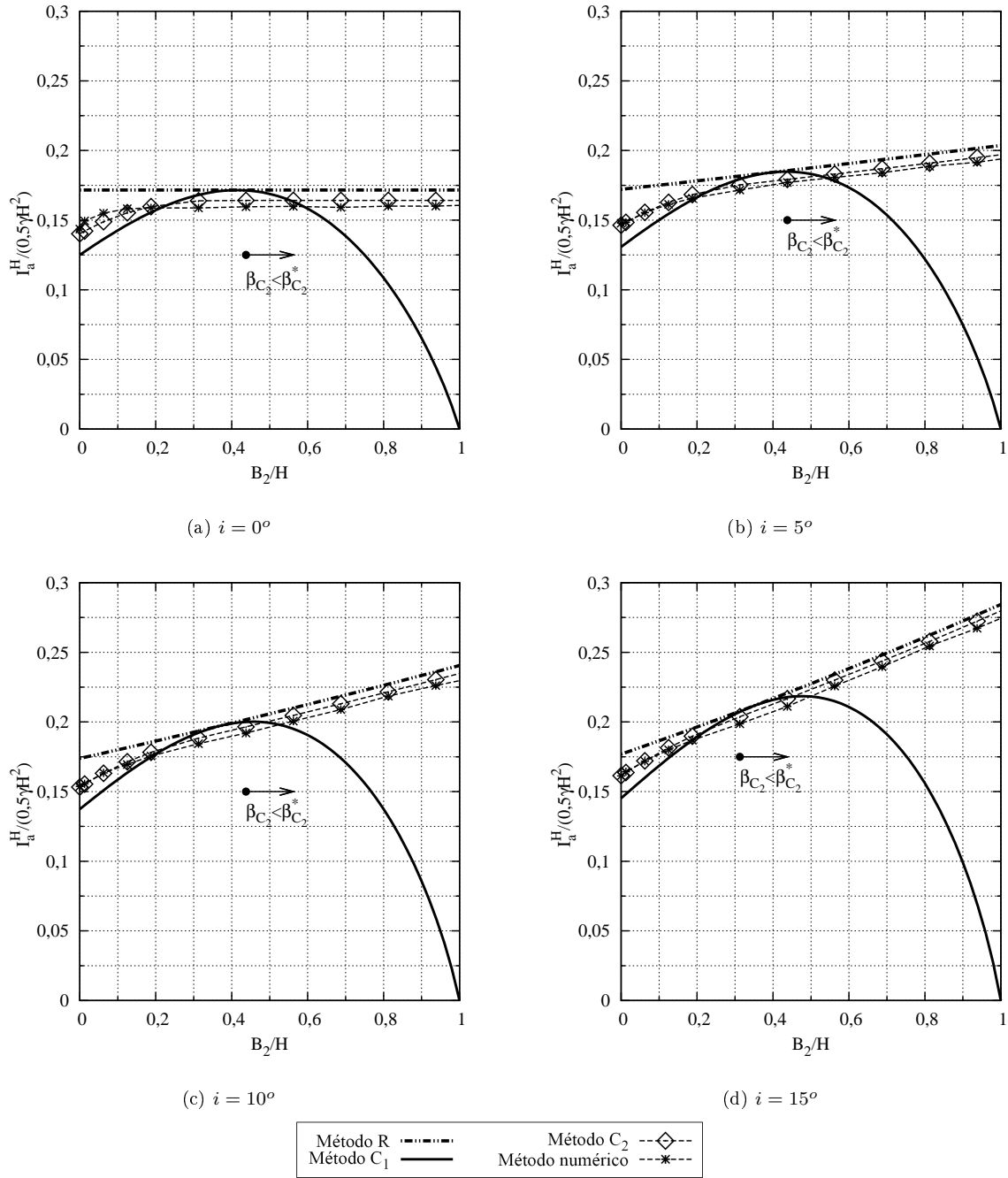


Figura 4.22: Variação do impulso activo horizontal, adimensionalizado, com a largura adimensionalizada do muro para diversas inclinações do terreno e $R_{inter} = 2/3$; $\phi' = 45^\circ$. Comparação com os métodos clássicos.

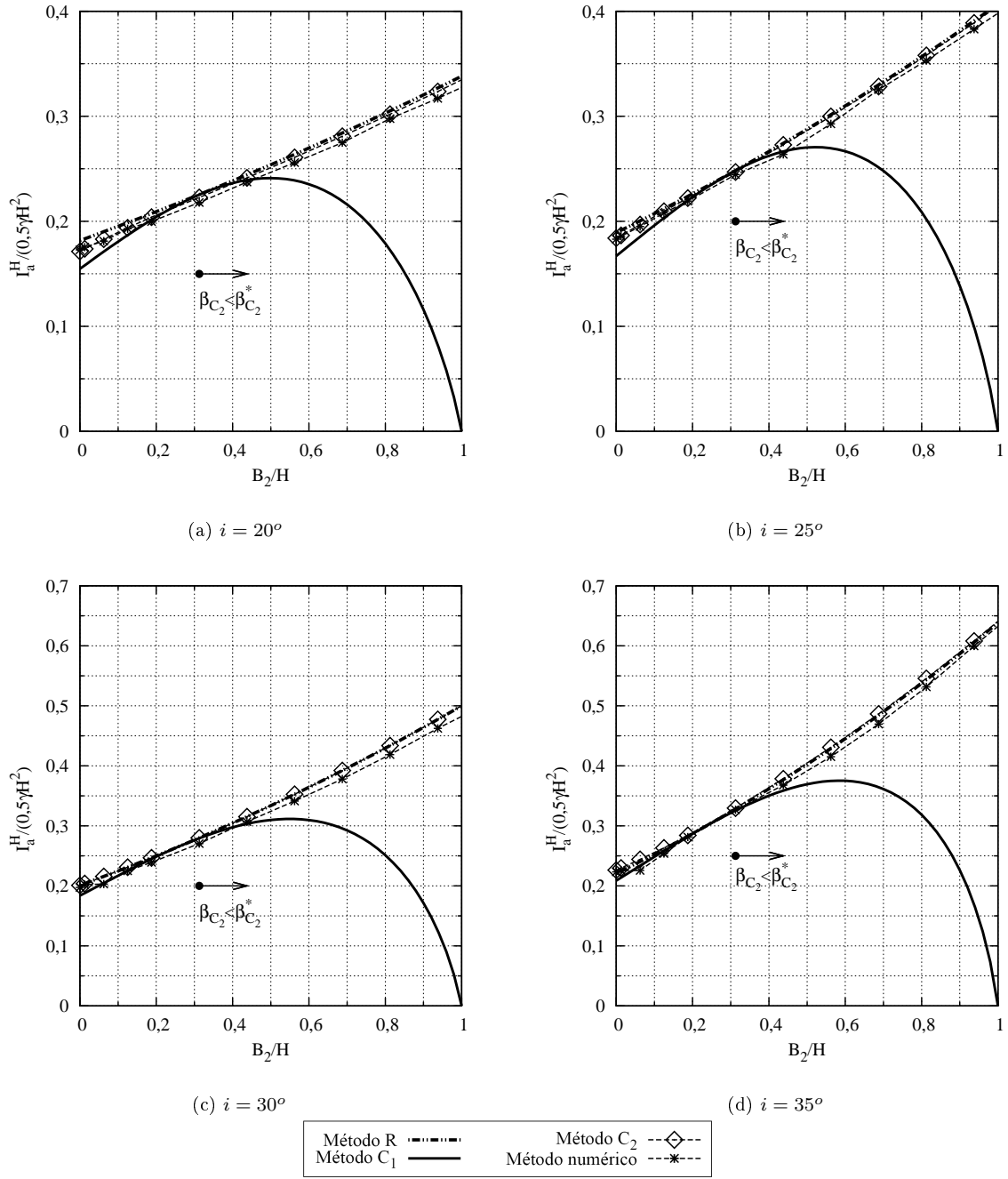


Figura 4.23: Variação do impulso activo horizontal, adimensionalizado, com a largura adimensionalizada do muro para diversas inclinações do terreno e $R_{inter} = 2/3$; $\phi' = 45^\circ$. Comparação com os métodos clássicos (continuação).

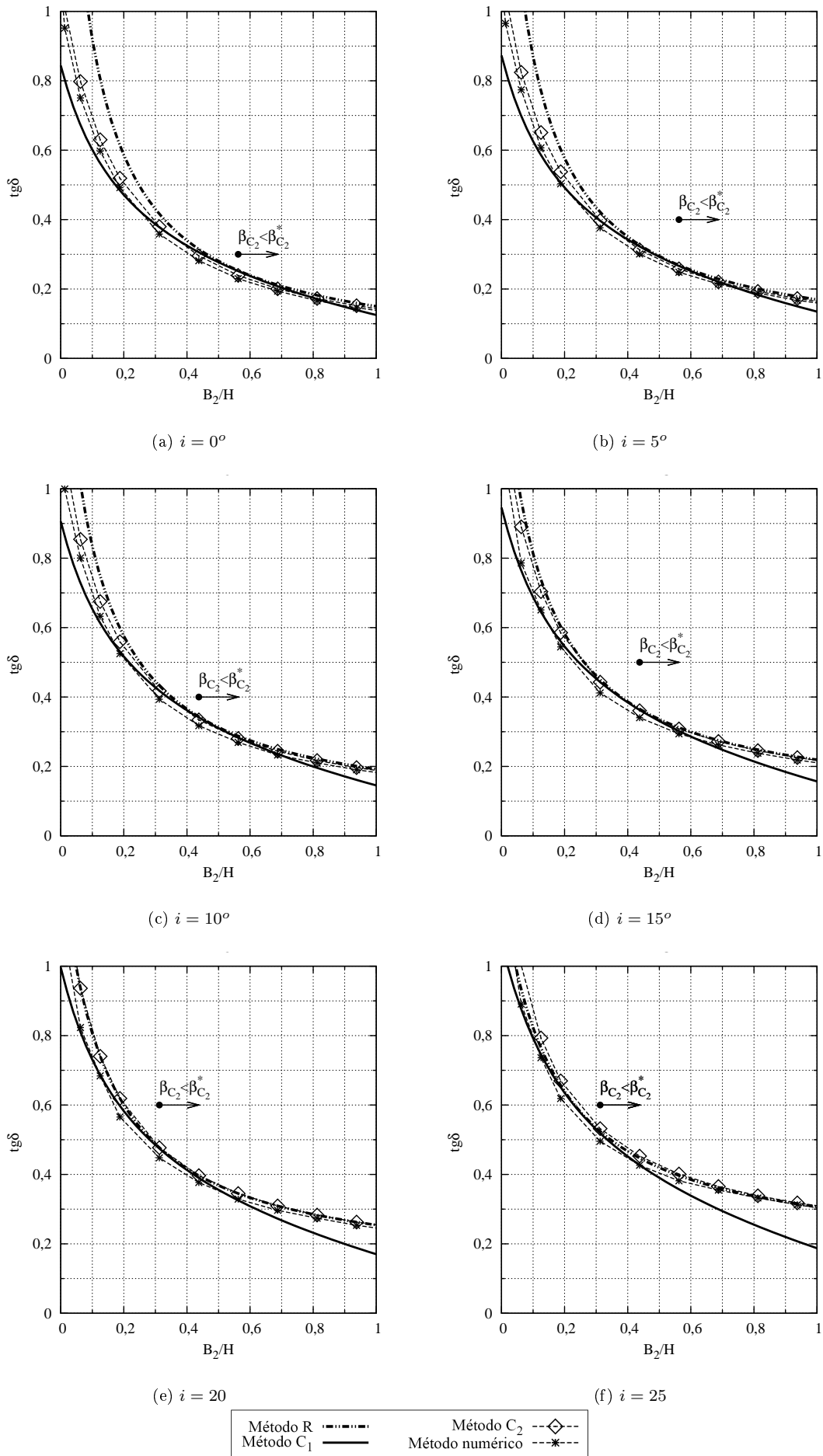


Figura 4.24: Variação da condição de deslizamento com a largura adimensionalizada do muro para diversas inclinações do terreno e $R_{inter} = 2/3$; $\phi' = 30^\circ$. Comparação com os métodos clássicos.

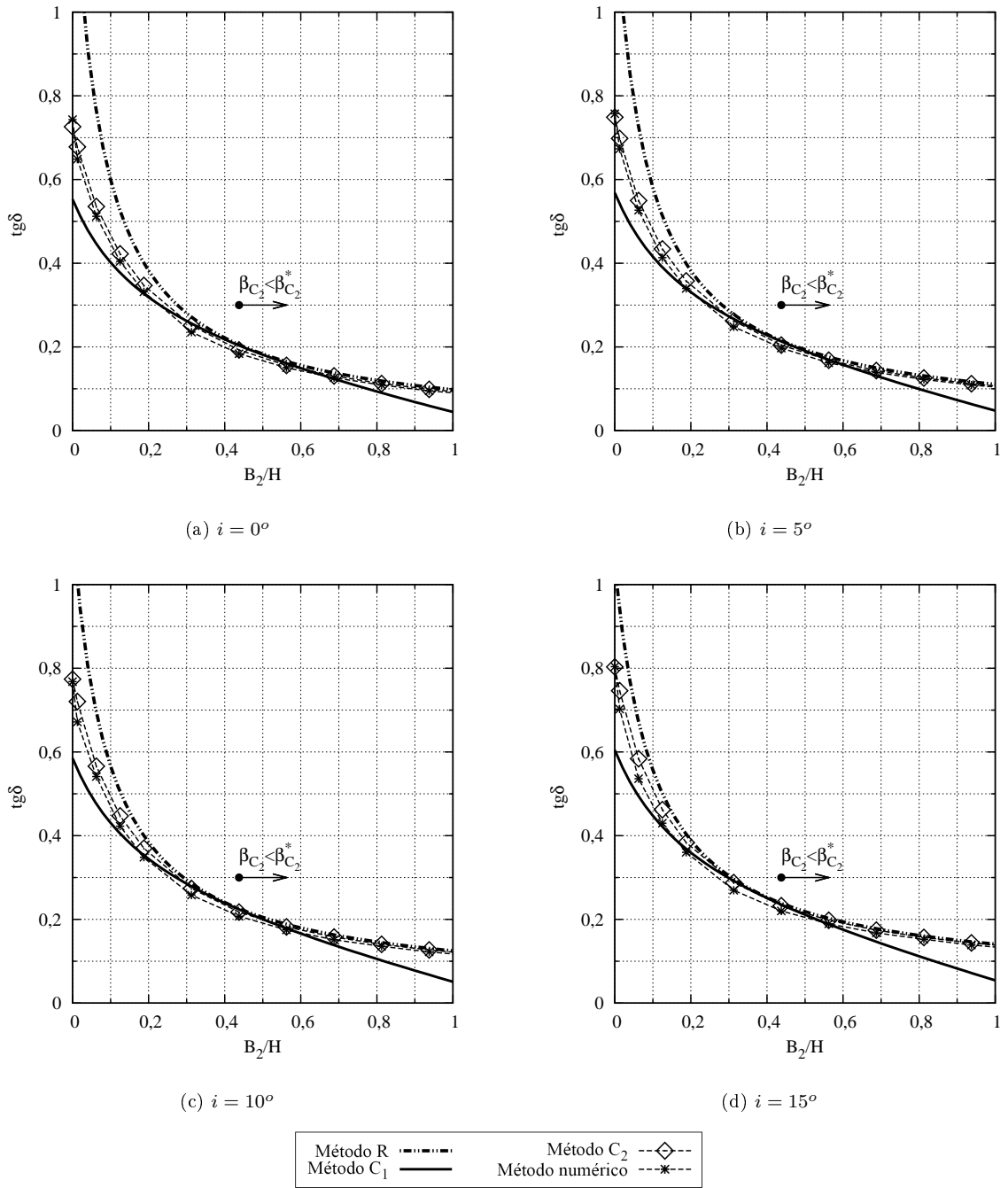


Figura 4.25: Variação da condição de deslizamento com a largura adimensionalizada do muro para diversas inclinações do terreno e $R_{inter} = 2/3$; $\phi' = 40$. Comparação com os métodos clássicos.

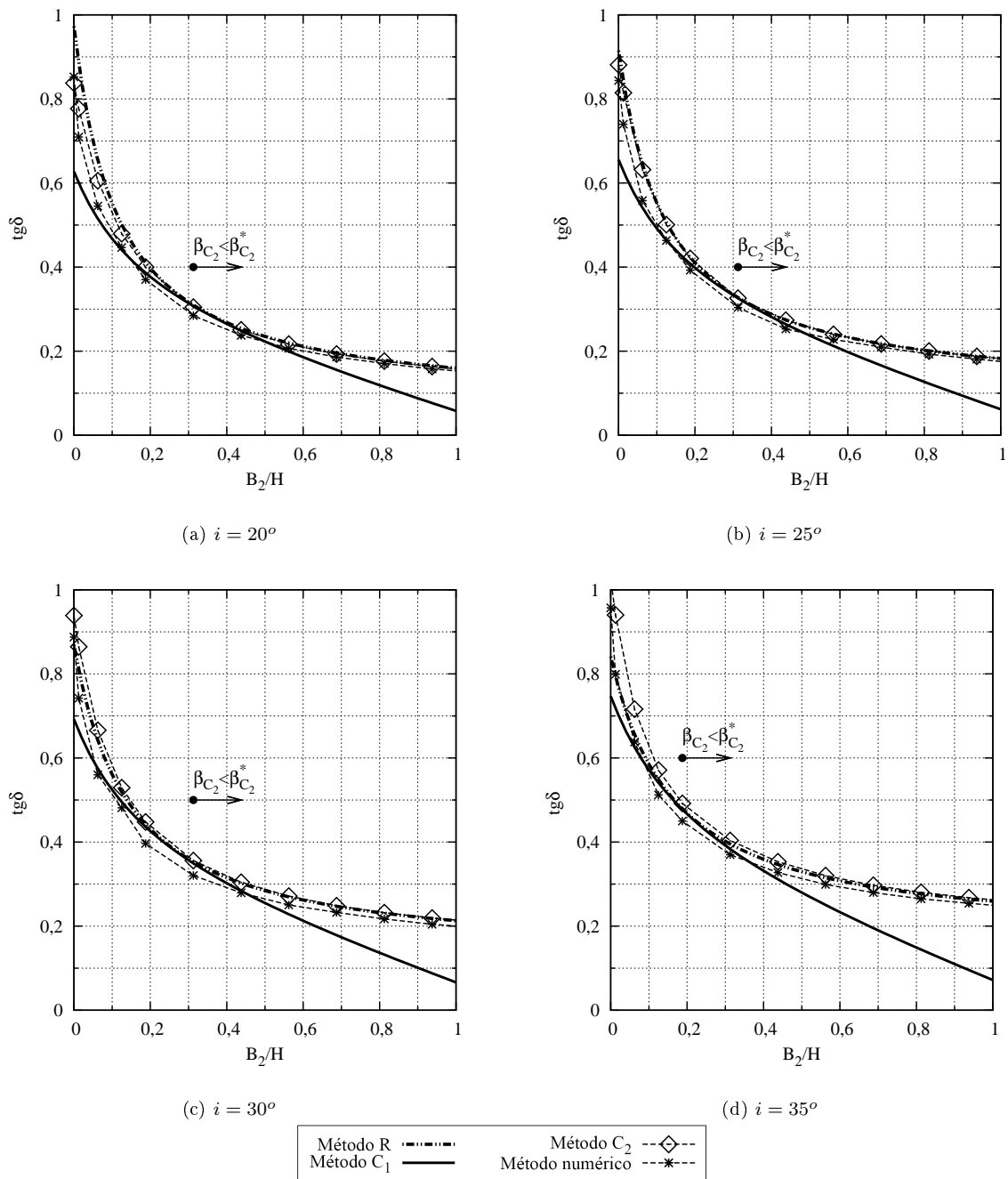


Figura 4.26: Variação da condição de deslizamento com a largura adimensionalizada do muro para diversas inclinações do terreno e $R_{inter} = 2/3$; $\phi' = 40$. Comparação com os métodos clássicos (continuação).

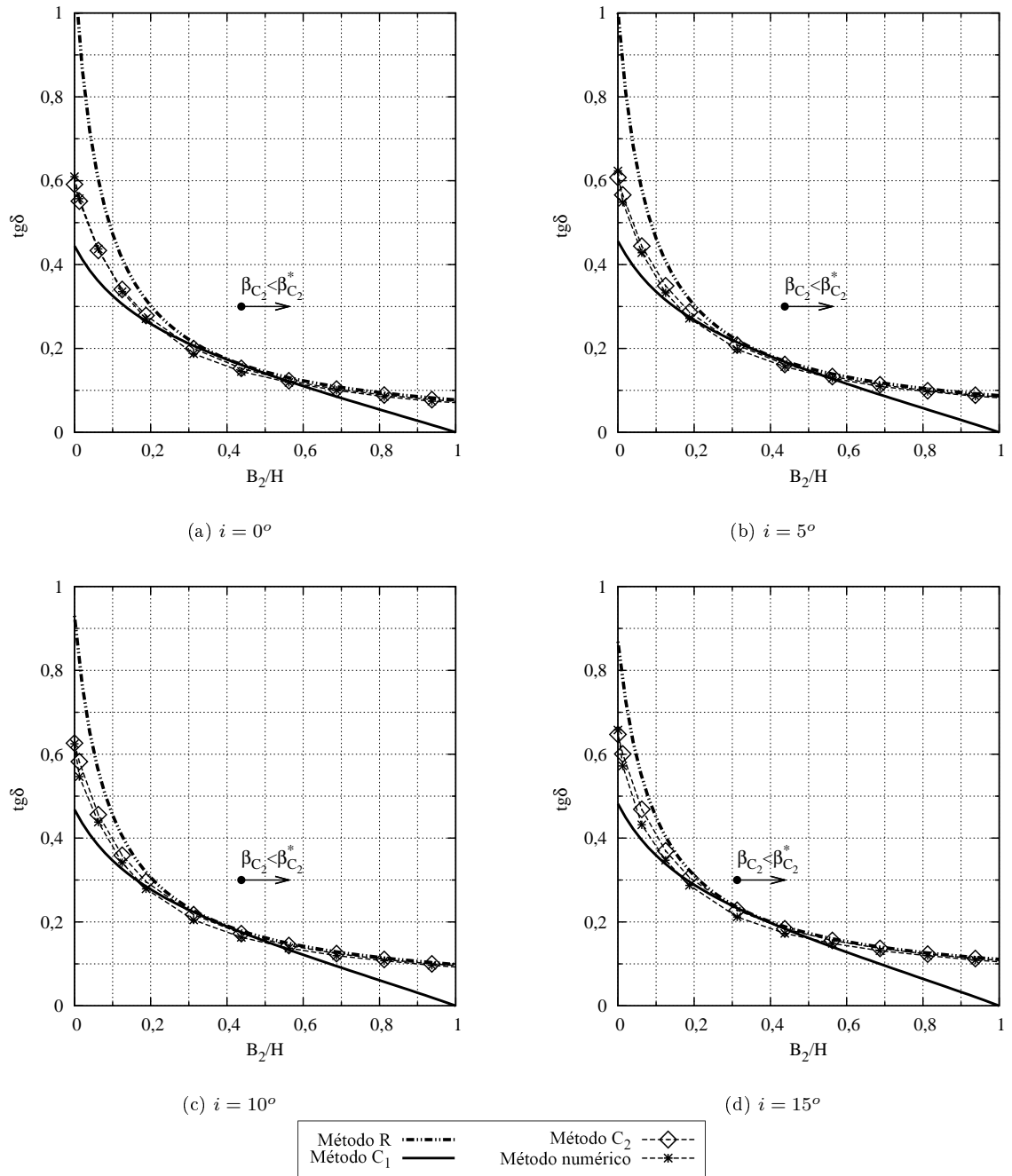


Figura 4.27: Variação da condição de deslizamento com a largura adimensionalizada do muro para diversas inclinações do terreno e $R_{inter} = 2/3$; $\phi' = 45^\circ$. Comparação com os métodos clássicos.

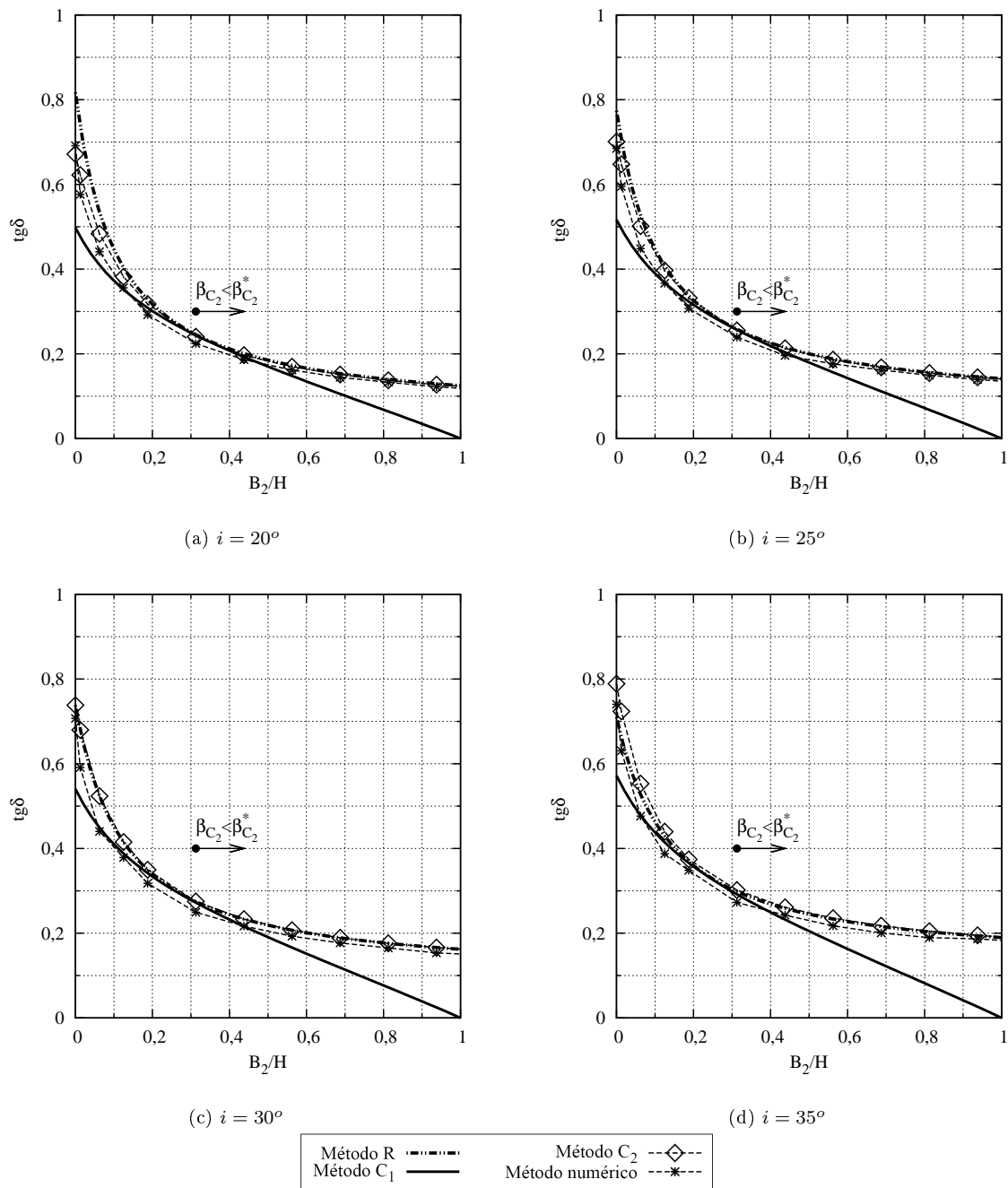


Figura 4.28: Variação da condição de deslizamento com a largura adimensionalizada do muro para diversas inclinações do terreno e $R_{inter} = 2/3$; $\phi' = 45^\circ$. Comparação com os métodos clássicos (continuação).

Apresentam-se, nas Figuras 4.29 a 4.32, as superfícies inferidas dos pontos plásticos, em função do comprimento da base do muro. A estas sobrepõem-se as superfícies obtidas pelo método C_2 por forma a compararem-se. Assim, na Figura 4.29 apresentam-se os resultados para $i = 0^\circ$ e $\phi' = 30^\circ$. Na Figura 4.30 apresentam-se os resultados para $i = 0^\circ$ e $\phi' = 40^\circ$. Na Figura 4.31 apresentam-se os resultados para $\phi' = 30^\circ$ e $i = \phi'/2 = 15^\circ$ e na Figura 4.32 os resultados para $\phi' = 40^\circ$ e $i = \phi'/2 = 20^\circ$.

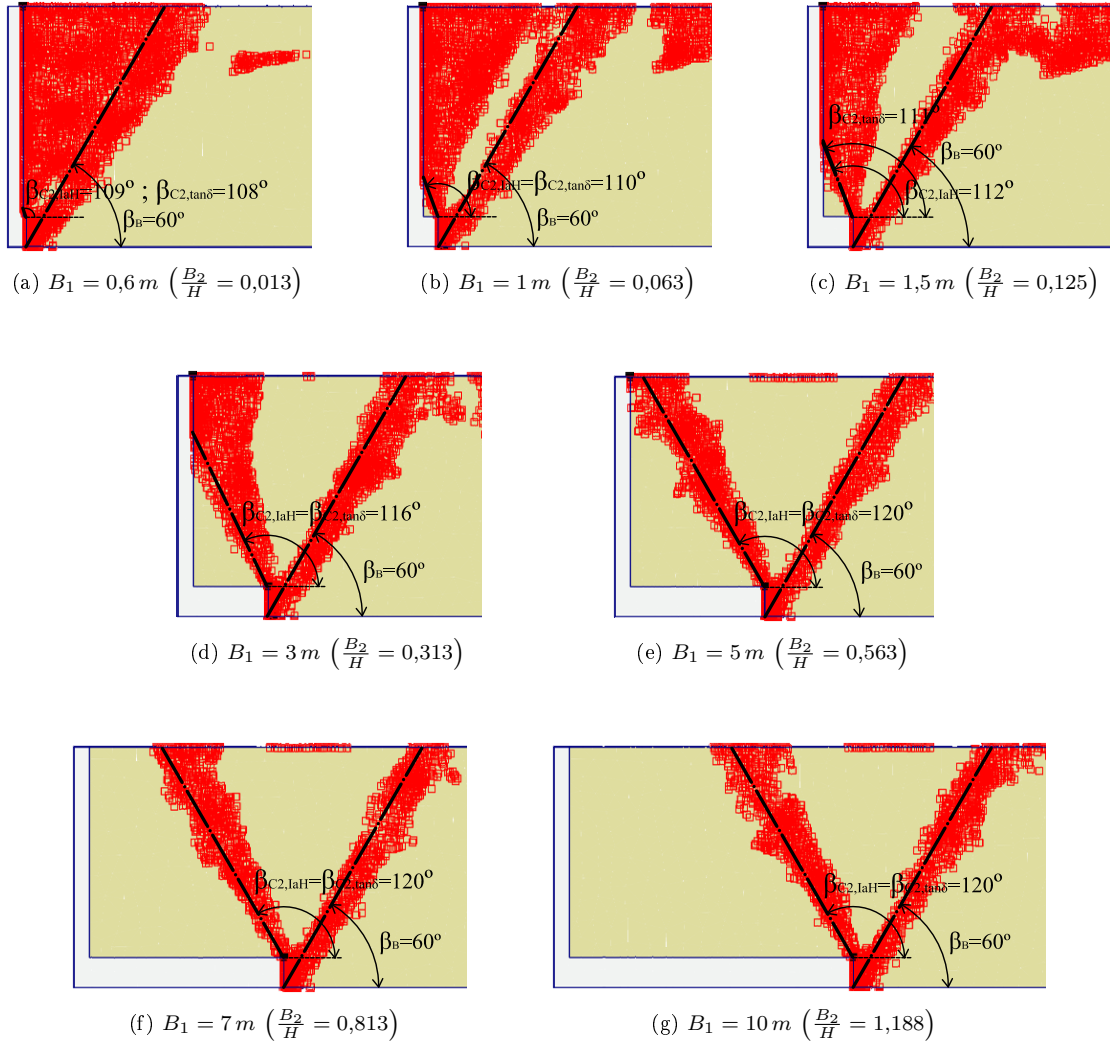


Figura 4.29: Representação dos pontos plásticos em função do comprimento da base para $\phi' = 30^\circ$; $R_{inter} = 2/3$; $i = 0^\circ$. Sobreposição das superfícies resultantes da aplicação do método C_2 .

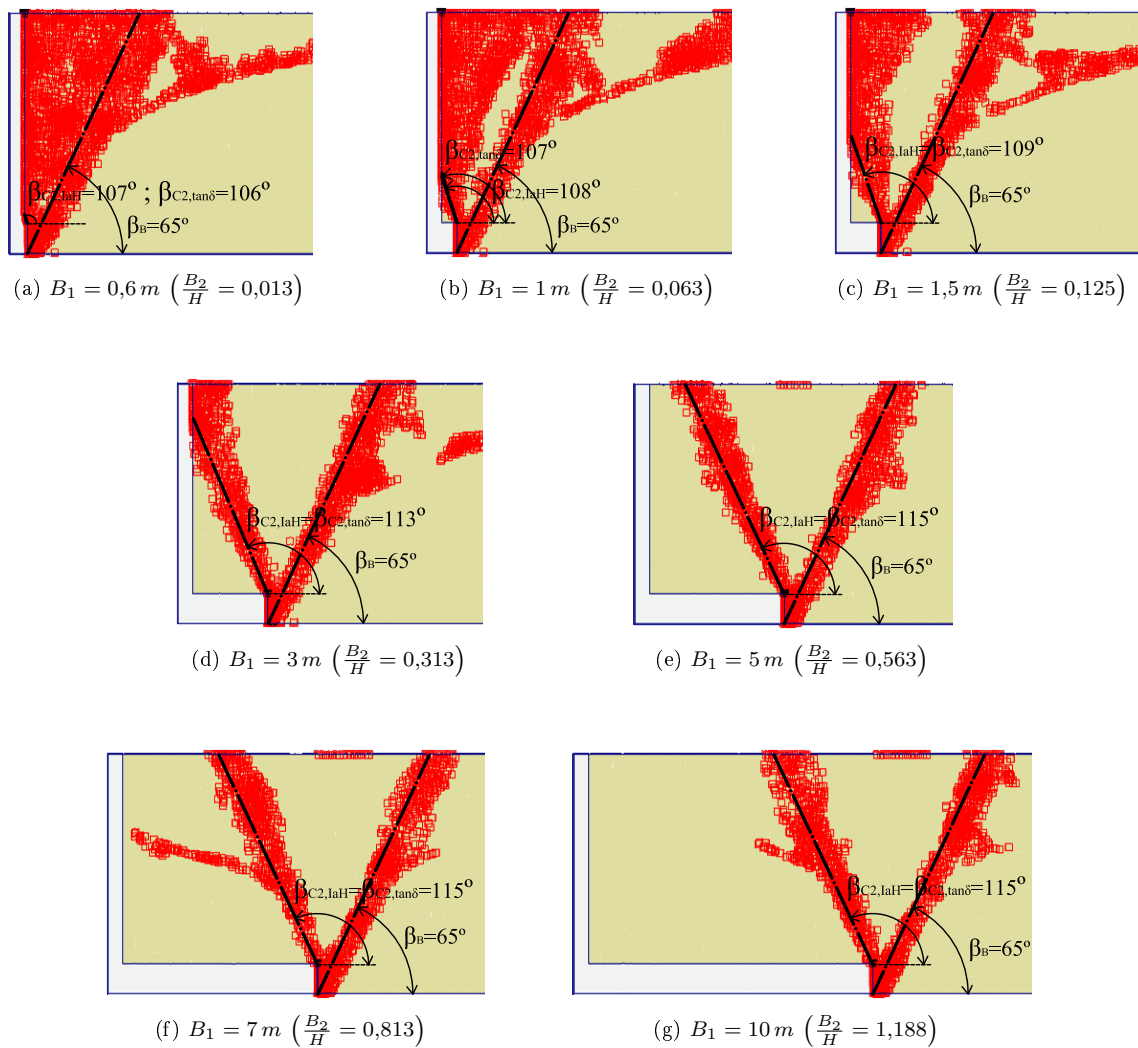


Figura 4.30: Representação dos pontos plásticos em função do comprimento da base para $\phi' = 40^\circ$; $R_{inter} = 2/3$; $i = 0^\circ$. Sobreposição das superfícies resultantes da aplicação do método C_2 .

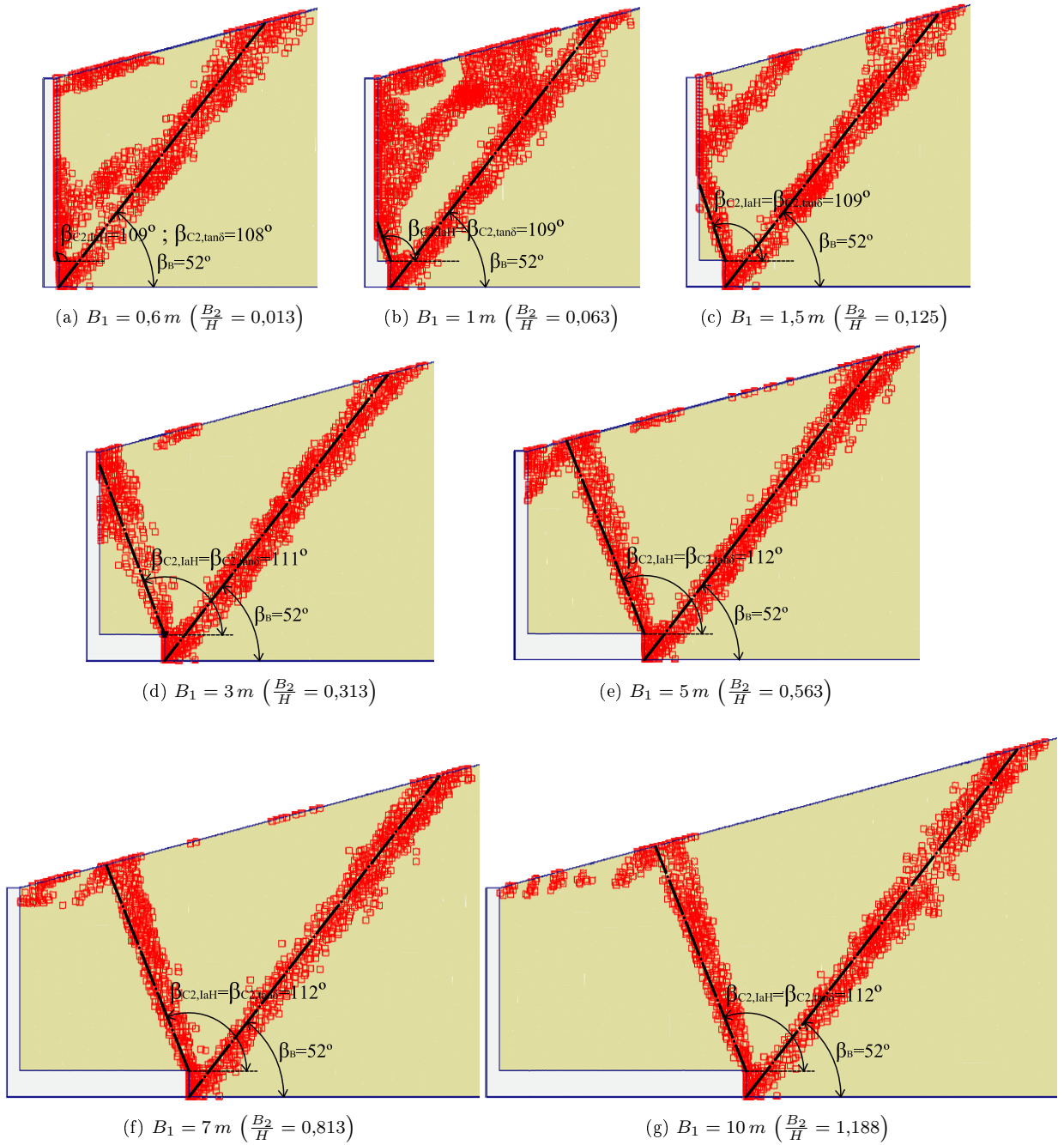


Figura 4.31: Representação dos pontos plásticos em função do comprimento da base para $\phi' = 30^\circ$; $R_{inter} = 2/3$; $i = 15^\circ$. Sobreposição das superfícies resultantes da aplicação do método C_2 .

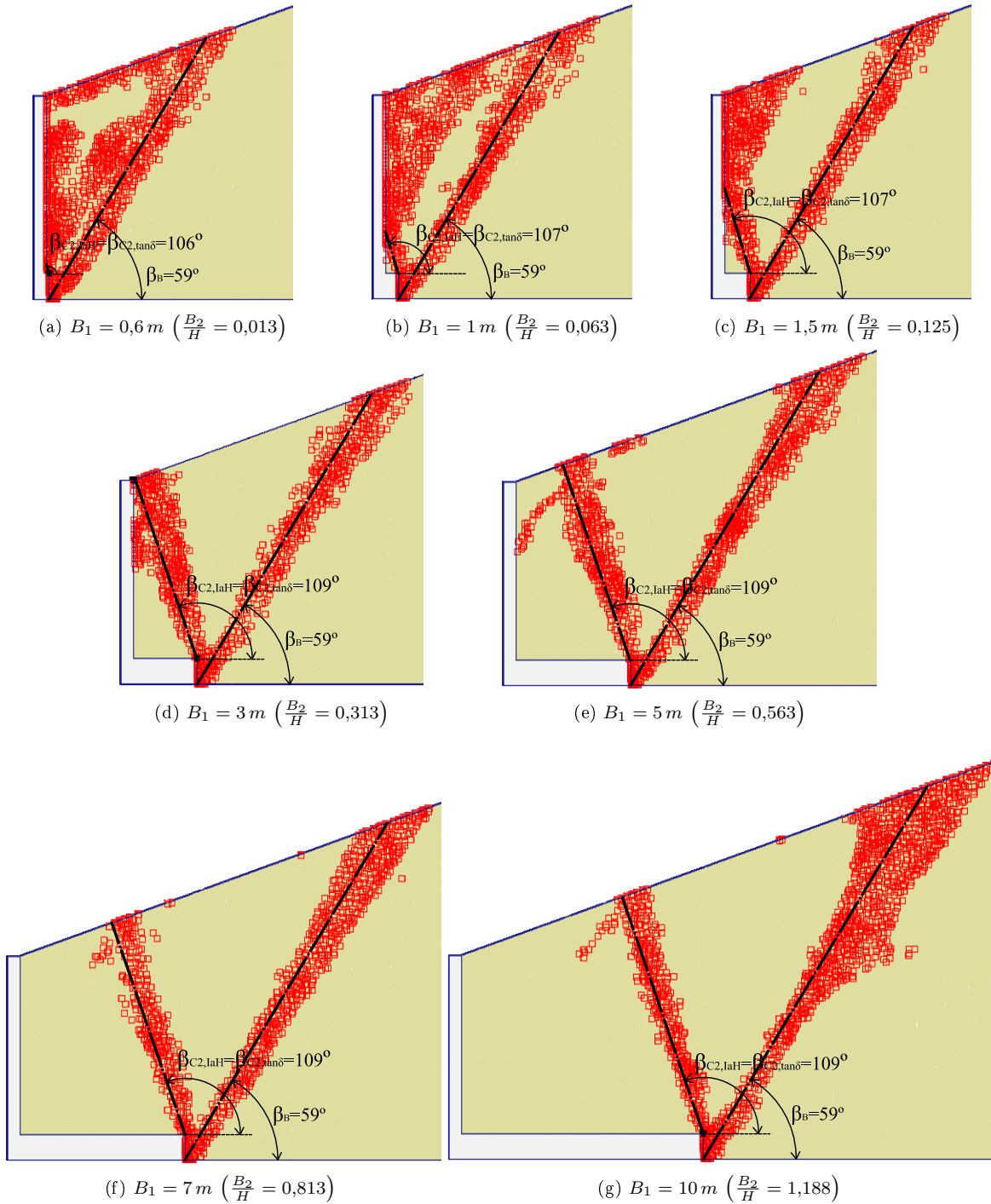


Figura 4.32: Representação dos pontos plásticos em função do comprimento da base para $\phi' = 40^\circ$; $R_{inter} = 2/3$; $i = 20^\circ$. Sobreposição das superfícies resultantes da aplicação do método C_2 .

4.4.4.3 Análise dos resultados

Pela análise dos resultados obtidos é possível afirmar que existe uma proximidade relativa entre os métodos numérico e C_2 , tanto no que respeita à relação $I_a^H/1/2\gamma H^2$, como a $\tan \delta$. Este facto é também mostrado pela coincidência das superfícies apresentadas nas Figuras 4.29 a 4.32. Por outro lado, as superfícies obtidas por Barghouthi mostram-se aproximadas às obtidas numericamente.

4.4.5 Análise da influência da inclinação da superfície do terreno i

4.4.5.1 Análises realizadas

A influência da inclinação da superfície do terreno suportado no impulso activo e, consequentemente, na condição de deslizamento do muro, é analisada na presente secção. As dimensões da estrutura adoptadas para a análise presente são as consideradas para o caso base, dispostas na Figura 4.4. Para as mesmas condições do solo e do muro do caso base, são consideradas diferentes inclinações, com a finalidade de se analisar a evolução do impulso activo (dado pela relação $I_a^H/1/2\gamma H^2$) e da condição de deslizamento do muro (dada por $\tan \delta$) com o seu aumento. As análises aqui apresentadas são um subconjunto da secção 4.4.4.

4.4.5.2 Resultados

Na Figura 4.33 apresenta-se o impulso activo, dado pela razão adimensional $I_a^H/1/2\gamma H^2$, em função do aumento da inclinação i . Os resultados são sobrepostos aos obtidos através dos métodos clássicos, por forma a poderem comparar-se entre si.

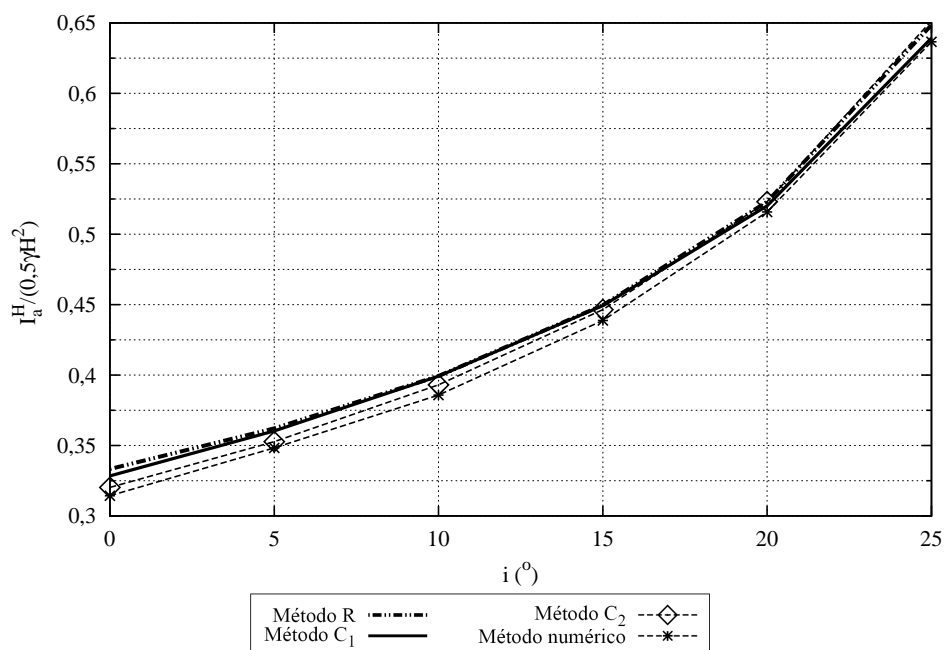


Figura 4.33: Influência da inclinação da superfície do terreno i no impulso activo horizontal para $\frac{B_2}{H} = 0,438$; $R_{inter} = \frac{2}{3}$; $\phi' = 30^\circ$. Comparação com os métodos clássicos.

A Figura 4.34 apresenta a condição de deslizamento do muro, dada por $\tan \delta$, em função da inclinação da superfície do terreno suportado.

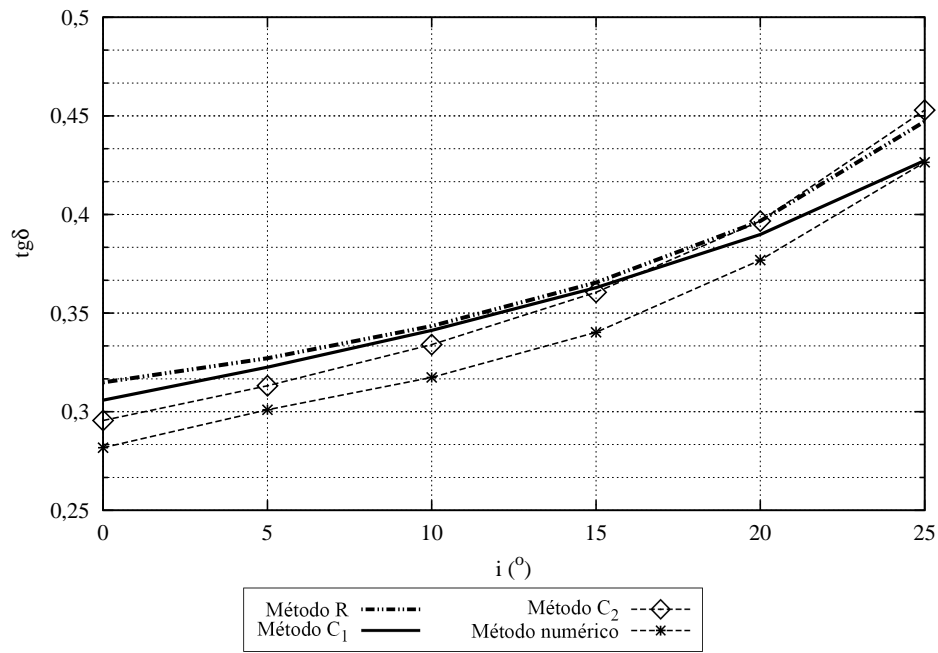


Figura 4.34: Influência da inclinação da superfície do terreno i na condição de deslizamento do muro para $\frac{B_2}{H} = 0,438$; $R_{inter} = \frac{2}{3}$; $\phi' = 30^\circ$. Comparação com os métodos clássicos.

As superfícies obtidas pelos pontos plásticos, para um terreno com resistência ao corte igual a 30° e para um muro com as dimensões apresentadas para o caso base, encontram-se representadas na Figura 4.35. As superfícies são apresentadas em função da inclinação da superfície do terreno.

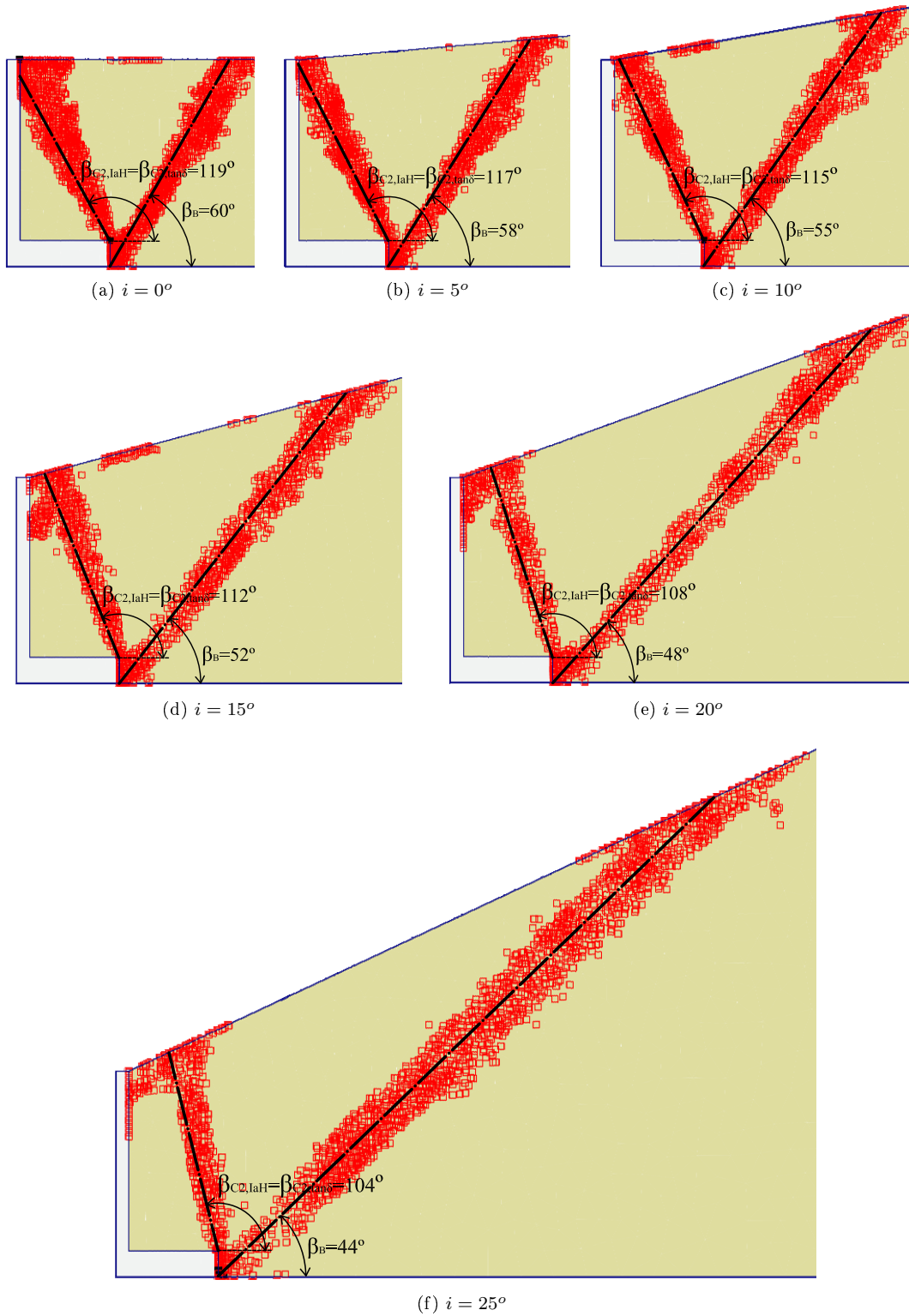


Figura 4.35: Representação dos pontos plásticos em função da inclinação da superfície do terreno para $B_1 = 4\text{ m}$; $\phi' = 30^\circ$; $R_{inter} = 2/3$. Sobreposição das superfícies resultantes da aplicação do método C_2 .

4.4.5.3 Análise dos resultados

Para o caso analisado ($B_1 = 4m$; $B_2/H = 0,438$) todos os métodos apresentam, praticamente, os mesmos resultados de I_a^H . Há, em particular, grande proximidade entre os resultados do método numérico e os do método C_2 .

No que respeita à $\tan \delta$, verifica-se que os vários métodos apresentam resultados semelhantes, sendo os obtidos numericamente os de menor valor.

Pela análise da Figura 4.35 é possível afirmar que com o aumento da inclinação do terreno, a semelhança entre as bandas de pontos plásticos e as superfícies definidas por β_{C2, I_a^H} e $\beta_{C2, \tan \delta}$ se mantém, sendo as últimas coincidentes entre si. Os resultados obtidos por Barghouthi são semelhantes aos resultados obtidos numericamente.

Capítulo 5

Conclusões e futuros desenvolvimentos

5.1 Conclusões

Identificaram-se três métodos para a determinação dos impulsos activos de terras sobre muros de suporte em consola: um método - que foi, no presente trabalho, identificado por método R - baseado na teoria de Rankine, um método - identificado por C_1 - baseado na mobilização dos impulsos numa superfície virtual simplificada e na aplicação do método de Coulomb e, finalmente, um método - identificado por C_2 - também baseado no método de Coulomb e que consiste na busca da superfície virtual que conduz ao maior impulso activo horizontal ou à condição de estabilidade do muro mais desfavorável.

Desenvolveram-se expressões para, para cada método, determinar o impulso activo horizontal adimensionalizado pelo peso volúmico do solo e pela altura do muro. Desenvolveram-se igualmente expressões que, para cada método, definem a relação entre o impulso activo horizontal e a resultante das cargas verticais. Esta relação traduz a tangente do ângulo de atrito solo-base necessário para a verificação da condição de deslizamento do muro. Constatou-se que, para além de dependentes das propriedades do solo suportado, as referidas expressões dependem de parâmetros geométricos do muro. Não foram consideradas, nestas expressões, quaisquer sobrecargas aplicadas à superfície do terreno. Compararam-se os resultados obtidos para ambas as grandezas - impulso activo horizontal adimensionalizado e tangente do ângulo de atrito solo-base (condição de deslizamento).

Em relação ao impulso activo horizontal verifica-se que:

- o método R conduz, normalmente, a valores do impulso activo horizontal adimensionalizado superiores aos restantes métodos. As excepções verificam-se para inclinações do terreno superiores ao ângulo de atrito solo-paramento; para estes casos, o método C_2 apresenta valores ligeiramente superiores;
- existe uma gama de valores da largura do muro para os quais os resultados dos métodos R e C_1 são praticamente iguais;
- o método C_1 afasta-se dos restantes para larguras do muro elevadas.

Em relação à tangente do ângulo de atrito solo-base necessário para a verificação da condição de deslizamento do muro, verifica-se que:

- existe semelhança entre os resultados de $\tan \delta$ obtidos pelos três métodos para larguras do muro intermédias;

- para larguras do muro pequenas, os resultados do método C_2 são inferiores aos do método R quando $i < \delta$; são iguais quando $i = \delta$; são superiores quando $i > \delta$;
- para larguras do muro grandes, existe grande semelhança entre os métodos R e C_2 .

Aplicou-se o método dos elementos finitos, usando um modelo elástico-perfeitamente plástico com lei de fluxo associada à determinação numérica dos impulsos activos sobre muros de suporte em consola.

O impulso activo foi mobilizado aplicando aos elementos que simulam o muro de suporte um deslocamento horizontal no sentido contrário ao terreno suportado. Admitiu-se ter atingido o impulso activo quando a força horizontal total aplicada pelo solo ao muro estabilizou. Dos cálculos realizados, retiraram-se os impulsos horizontais, as cargas verticais na base e a localização dos pontos plásticos. Procedeu-se a análises paramétricas relativas à rugosidade do contacto entre o muro e o solo suportado, ao ângulo de resistência ao corte do solo suportado, à largura da base do muro e à inclinação do terreno. Compararam-se os valores dos impulsos activos horizontais e os valores da tangente do ângulo de atrito solo-base necessário para a verificação da condição de deslizamento com os obtidos anteriormente através dos métodos R , C_1 e C_2 .

Relativamente à rugosidade do contacto entre o muro e o terreno suportado, verificou-se que se trata de um parâmetro que, pelo menos para a geometria estudada, não é relevante, dado que nem o impulso activo horizontal adimensionalizado nem a tangente do ângulo de atrito solo-base apresentam variações significativas com essa rugosidade.

Na análise paramétrica relativa ao ângulo de resistência ao corte do solo suportado foi também apenas considerada uma geometria do muro. Para esse caso verificou-se uma quase coincidência entre os resultados numéricos e os métodos R , C_1 e C_2 , tanto no que respeita ao impulso adimensionalizado como no que respeita à tangente do ângulo de atrito solo-base.

A análise paramétrica relativa à largura da base foi realizada em conjunto com a análise paramétrica da inclinação do terreno suportado e os resultados mostram proximidade entre o método numérico e o método C_2 .

Finalmente, refere-se que existe uma notória semelhança entre as bandas definidas pela localização dos pontos plásticos resultantes dos cálculos numéricos e as superfícies obtidas por aplicação do método C_2 , definidas por β_{C_2, I_a^H} e $\beta_{C_2, \tan \delta}$, independentemente do caso analisado. Igualmente, as bandas de pontos plásticos que definem a inclinação da cunha de solo são semelhantes às superfícies definidas por Barghouthi (1990).

Comparando os diversos métodos com as análises numéricas e assumindo estas como rigorosas, conclui-se que o método R é sempre adequado para muros com sapatas longas e também para sapatas curtas quando $i \leq \delta$. Para $i > \delta$, o método C_2 fornece resultados mais adequados.

Para uma estimativa adequada do impulso horizontal, o método C_2 parece ser o mais adequado, para uma gama de geometria mais alargada. No entanto, faz-se notar que o método R é, na generalidade, conservativo. Para efeitos de dimensionamento ao deslizamento, o método C_2 fornece bons resultados, mas não substancialmente melhores do que o método R , que parece revelar-se perfeitamente adequado.

5.2 Futuros desenvolvimentos

Com a finalidade de contribuir para o seguimento de estudos futuros dentro do assunto apresentado na presente dissertação, um dos aspectos que se demonstra mais relevante é a consideração de sobrecargas actuantes na superfície do terreno suportado.

De forma complementar, a consideração de outros modos de rotura da estrutura, como por exemplo, rotura da fundação, derrubamento ou rotura estrutural, demonstra-se igualmente relevante.

Deve igualmente procurar analisar-se, em maior detalhe do que o que foi possível no presente trabalho, a influência da rugosidade solo-paramento nos resultados do impulso horizontal e da condição de deslizamento.

Refere-se, finalmente, que os casos de bases de pequena dimensão (em que a superfície virtual intersecta o paramento) são os que merecem maior atenção, na medida em que os restantes parecem resolvidos.

Bibliografia

- Aguiar, M. A. e Martins, J. G. (2005). *Estruturas - Contenção lateral de solos*. Universidade Fernando Pessoa, Porto, 1^a edição.
- Barghouthi, A. F. (1990). Active earth pressure on walls with base projection. *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, 116(10):1570–1575.
- Brinkgreve, R. B. J., Broere, W., e Waterman, D. (2004). *PLAXIS: Finite Element Code for Soil and Rock Analyses (2D - Version 8)*.
- BS 8022:1994 (2002). Code of practice for earth retaining walls. British Standard.
- Cernica, J. N. (1994). *Foundation design*. John Wiley & Sons, Inc.
- Domingues, P. C. (1997). Indicações para projecto de muros de arrimo em concreto armado. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil.
- EM 1110-2-2502 (1989). Engineering and design - retaining and flood walls. U. S. Army Corps of Engineers.
- EN 1992-1 (2001). Eurocode 2, Design of concrete structures, part 1: General rules and rules for buildings. CEN, European Committee for Standardization, Brussels.
- Gerscovich, D. M. S. (2006). Estruturas de contenção. Faculdade de Engenharia - Universidade do Rio de Janeiro.
- Greco, V. R. (1992). Discussion to active earth pressure on walls with base projection. *ASCE Journal of Geotechnical Engineering Division*, 118(5):825–827.
- Greco, V. R. (1999). Active earth thrusts on cantilever walls in general conditions. *Soils and Foundations*, 39(6):65–78.
- Greco, V. R. (2001). Active earth thrust on cantilever walls with short heel. *Canadian Geotechnical Journal*, 38(2):401–409.
- Maccaferri (2003). *Road works, Problems and solutions - Gravity earth retaining structures*. Maccaferri - Environmental solutions.
- Mascarenhas, J. (2002). *Sistemas de construção*. Livros Horizonte, Lisboa. (não consultado directamente).
- Matos Fernandes, A. M. (2011). *Mecânica dos solos. Introdução à Engenharia Geotécnica*, volume 2. FEUP Edições. A publicar.

- Matos Fernandes, A. M., Mateus de Brito, J., Silva Cardoso, A., e Vieira, C. F. S. (1997). Estruturas de suporte. Em *25 Anos Sociedade Portuguesa de Geotecnia - Eurocódigo 7: Projecto Geotécnico*, páginas IV-1 – IV-53. LNEC.
- Mineiro, A. J. C. (1978). *Mecânica dos solos e fundações - Impulsos de terras*. Universidade Nova de Lisboa.
- Moliterno, A. (1980). *Caderno de muros de arrimo*. Edgard Blucher, São Paulo, Brasil, 2ª edição. (não consultado directamente).
- Rocha, A. M. (1974). *Novo curso prático de concreto armado*, volume 3. Científica, Rio de Janeiro, Brasil. (não consultado directamente).
- Terzaghi, K., Peck, R. B., e Mesri, G. (1948). *Soil mechanics in engineering practice*. John Wiley and Sons, New York, 3ª edição.